

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**В.Г. Колобродов, В.І. Гордієнко, В.І. Микитенко,
І.В. Мазурін, С.І. Ключас**

**НАУКОВО-ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ
СТВОРЕННЯ ТЕПЛОВІЗІЙНИХ СИСТЕМ**

Монографія

Київ
НТУУ «КПІ»
2015

УДК 621.384
ББК 32.86
К61

*Рекомендовано до видання Вченою радою НТУУ «КПІ»
(протокол № 3 від 6.04.2015 р.)*

Рецензенти:

д-р техн.наук, проф. С.О. Воронов (НТУУ «КПІ»)

д-р техн.наук С.І. Черняк (КП СПБ «Арсенал»)

Відповідальний редактор

д-р техн.наук І.Г. Чиж (НТУУ «КПІ»)

К61 Науково-практичні аспекти створення тепловізійних систем:
монографія / В.Г. Колобродов, В.І. Гордієнко, В.І. Микитенко,
І.В. Мазурін, С.І. Ключас – Черкаси: «Вертикаль», 2015. - 150 с.
ISBN 978-966-2783-60-5

Розглянуто широке коло питань, які пов'язані з аналізом і синтезом тепловізійних систем спостереження (ТПСС), узгодженням параметрів їх основних блоків, конструюванням, розробкою методів підвищення ефективності функціонування та експериментальним визначенням основних характеристик ТПСС.

Для наукових та інженерно-технічних працівників, студентів напряму підготовки 6.051004 «Опtotехніка».

**УДК 621.384
ББК 32.86**

ISBN 978-966-2783-60-5

Наукове видання

Колобродов Валентин Георгійович

Гордієнко Валентин Іванович

Микитенко Володимир Іванович

Мазурін Ігор Володимирович

Клюфас Степан Іванович

НАУКОВО-ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ СТВОРЕННЯ ТЕПЛОВІЗІЙНИХ СИСТЕМ

Монографія

В авторській редакції

Технічний редактор, дизайнер С.А. Кандич

Подано на укладання 11.04.2015. Підп. до друку 09.06.2015.
Формат 60x84¹/₁₆. Папір офс. Гарнітура Times New Roman.
Ум. друк. арк. 9,50. Обл. вид. арк. 8,80. Вид. №261.
Наклад 300 пр. Зам. №22

Видавець і виготівник видавництво «Вертикаль»
18000, м. Черкаси, вул. Б.Вишневецького, 2, к. 6
Тел. (0472) 50-07-63

ЗМІСТ

Вступ	5
1 Інженерні розрахункові методики аналізу і синтезу	
тепловізійних систем	8
1.1 Загальні положення і визначення	8
1.2 Максимальна дальність спостереження ТПСС	16
1.3 Стандарт НАТО для розрахунку максимальної дальності спостереження ТПСС	19
1.4 Вплив атмосфери на дальність спостереження	20
1.5 Порівняльний аналіз різних методів розрахунку дальності виявлення і розпізнавання	26
1.6 Приклад розрахунку максимальної дальності спостереження	28
1.7 Загальне рівняння для розрахунку максимальної дальності дії тепловізійної системи спостереження	34
1.8 Приклад розрахунку максимальної дальності розпізнавання	37
1.9 Просторова роздільна здатність.....	40
1.10 Забезпечення температурного та просторового розділення	41
1.11 Поле зору	45
1.12 Синтез тепловізійної системи за критерієм максимальної дальності спостереження	46
Програма розрахунку максимальної дальності виявлення, розпізнавання та ідентифікації в Mathcad	56
Програма розрахунку інтеграла (3.19) в Mathcad	58
Перелік посилань до розділу 1	59
2 Оптимізація і узгодження оптичних систем з приймачами випромінювання	61
2.1 Просторова роздільна здатність тепловізора	61
2.2 Критерії узгодження МПФ об'єктива і МПВ	63
2.3 Узгодження параметрів об'єктива і МПВ	64
Перелік посилань до розділу 2	70
3 Вибір матеріалів об'єктивів тепловізійних систем	71
3.1 Аналіз характеристик матеріалів ІЧ об'єктивів	71

3.2 Метод пасивної оптичної атермалізації лінзового трикомпонентного об'єктиву.....	73
3.3 Вибір композиції конструктивних параметрів оптичної схеми об'єктива тепловізійної системи спостереження	79
3.4 Проектування оптичної системи тепловізора та аналіз її характеристик	81
3.5 Аналіз впливу температури на якість зображення неатермалізованого ІЧ об'єктиву	85
Перелік посилань до розділу 3	89
4 Підвищення ефективності систем спостереження шляхом комплексування зображень	90
4.1 Обґрунтування концепції комплексування зображень	90
4.2 Методи комплексування зображень	94
4.3 Типові задачі комплексування в ТПСС	105
4.3.1 Спостереження в тумані чи в диму	105
4.3.2 Компенсація вібрацій і зсувів	110
4.3.3 Підвищення інформативності зображень	111
Перелік посилань до розділу 4	128
5 Розробка методик вимірювання основних технічних характеристик тепловізійних систем	135
5.1 Вимірювання еквівалентної шуму різниці температур	137
5.2 Вимірювання мінімальної виявлювальної різниці температур.....	138
5.3 Вимірювання мінімальної роздільної різниці температур.....	139
5.4 Вимірювання МПФ	140
Перелік посилань до розділу 5	151

ВСТУП

Тепловізійні системи спостереження (ТПСС) використовуються для вирішення широкого кола задач і як самостійний пристрій, і в складі багатоспектральних комплексів. Останнім часом завдяки появі недорогих теплових приймачів випромінювання інтерес до ТПСС значно зріс. Розширення ринку і доступність комплектуючих призвели до того, що промисловий випуск тепловізійної техніки налагоджується на багатьох невеликих виробничих підприємствах. Більшість з таких виробників не має можливості забезпечити наукове супроводження продукції. Наразі ненасиченість споживчого ринку тепловізійною технікою дозволяє утримувати високий рівень рентабельності навіть при невисоких показниках якості продукції. Але вже найближчим часом ситуація докорінно зміниться і виробникам значну увагу буде потрібно приділити питанням покращення продукції. Цьому безсумнівно сприяє активний розвиток теоретичних методів розрахунку і проектування ТПСС у світі. Але для невеликих виробничих фірм, які не мають власних науково-технічних підрозділів, корисними будуть не складні фізико-математичні моделі і розрахункові методи, а спрощені інженерні методики.

Ця монографія присвячена широкому колу питань, які є пов'язаними з аналізом, проектуванням, узгодженням параметрів основних блоків ТПСС, конструюванням, розробкою методів підвищення ефективності функціонування ТПСС. Загальновживаним є розділення етапів створення нової техніки на інформаційно-логічний, системотехнічний, схемотехнічний, конструкторський та технологічний. На практиці ці етапи часто реалізуються в рамках таких процесів: обґрунтування складу і розрахунок блоків і вузлів, оптимізація технічних параметрів і характеристик, конструювання

пристрою, розробка заходів для підвищення ефективності пристрою, експериментальне вимірювання характеристик готового пристрою.

Основою вищезазначених процесів має бути системно-структурний аналіз внутрішніх взаємозв'язків усіх основних факторів, що впливають на ефективність ТПСС. А саме: характеристики фоно-цільової обстановки (характеристик фону, енергетичні, просторово-геометричні, часові параметри об'єкта), основні технічні параметри ТПСС і його елементів (порога чутливості, просторової та часової роздільної здатності, поля зору, параметрів приймача випромінювання тощо), характеристики атмосфери, умови функціонування ТПСС (параметри руху носія, кут візування, час пошуку тощо), умови спостереження зображення (яскравості, контрастності, роздільної здатності, наявності та типу шумів, ресурсу часу), типу зорової задачі (виявлення об'єкта, розпізнавання, ідентифікація, усвідомлення ситуації) індивідуальних особливостей оператора.

Перший розділ монографії присвячено розробці спрощених методів аналізу та синтезу ТПСС: розрахунку відстаней виявлення, розпізнавання та ідентифікації на базі математичної моделі функціонування всіх блоків в рамках теорії лінійних систем; розрахунку основних технічних параметрів блоків ТПСС для забезпечення бажаних відстаней виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта.

Часто виникають ситуації, коли неможливо створити блоки ТПСС з розрахованими параметрами, але є можливість вибору з ряду блоків. Тоді виникає необхідність узгодження окремих блоків між собою для досягнення певного технічного результату. Методики узгодження та оптимізації параметрів вхідних блоків ТПСС розглянуто в другому розділі.

Третій розділ монографії присвячено важливому питанню конструювання ТПСС – вибору матеріалів об'єктива виходячи з

наявних вимог до якості системи. На базі конкретної оптичної схеми лінзового об'єктиву продемонстровано алгоритм забезпечення заданої якості.

В четвертому розділі розглянуто один з найперспективніших напрямів підвищення ефективності функціонування оптико-електронних систем спостереження - комплексуванню інформаційних каналів з ТПСС.

В п'ятому розділі коротко окреслені методи вимірювання основних характеристик ТПСС, теоретичне визначення яких було розглянуто в попередніх розділах монографії. Описано вимірювання як енергетичних, так і просторово-частотних характеристик ТПСС.

1 ІНЖЕНЕРНІ РОЗРАХУНКОВІ МЕТОДИКИ АНАЛІЗУ І СИНТЕЗУ ТЕПЛОВІЗІЙНИХ СИСТЕМ

1.1 Загальні положення і визначення

Узагальнені характеристики тепловізійної системи спостереження (ТПСС) або критерії якості – це міра успішного виконання завдань, що стоять перед системою, і враховують різноманітні тактико-технічні, експлуатаційні і техніко-економічні вимоги. У більшості випадків на практиці використовують критерії якості, які можна розділити на такі групи [1]:

- критерії якості зображення, яке сформовано в ТПСС;
- технічні параметри і характеристики системи;
- показники ефективності досягнення мети, заради якої створено ТПСС;
- техніко-економічні показники.

Якість зображення визначають такі показники, як геометрична роздільна здатність, або кутове та лінійне розділення, модуляційна передавальна функція (МПФ).

Тактико-технічні параметри і характеристики визначають можливість вирішення завдань, що стоять перед ТПСС, у різних умовах експлуатації. Головними із них є: еквівалентна шуму різниця температур (ЕШРТ) і мінімальна роздільна різниця температур (МРРТ). До цих показників також відносять: чутливість (порогова чутливість); динамічний діапазон яскравості, яку сприймає ТПСС; робочий спектральний діапазон; кутове поле зору; миттєве поле зору; формат зображення (кадру); число елементів розділення і деякі інші.

Показники ефективності ТПСС відображають статистичний характер вирішення завдань, які стоять перед цими системами. До цих

показників відносять, перш за все, максимальну дальність дії, виявлення, розпізнавання, ідентифікації або ймовірність виявлення, розпізнавання, ідентифікації.

До техніко-економічних показників слід віднести оціночну вартість системи, її технологічність, маса-габаритні параметри, час напрацювання на відмову, енергоспоживання та деякі інші.

Наведена класифікація показників якості умовна, оскільки багато з цих показників залежать один від одного. Деякі із наведених показників залежать не тільки від ТПСС, а також від умов роботи системи і спостерігача (оператора).

Враховуючи різноманіття завдань, які вирішують ТПСС, для характеристики їх якості використовують просторове, енергетичне, часове та спектральне розділення. Для більшості ТПСС, що працюють у статичному режимі, важливо забезпечити високе просторове й енергетичне розділення. Для систем, що працюють у динамічному режимі, крім високого просторового й енергетичного розділення, важливо забезпечити і часове розділення.

Узагальнені параметри і характеристики мають характеризувати ефективність роботи ТПСС в цілому. Їх визначають такі фактори:

1. Модуляційна передавальна функція усієї ТПСС без урахування шумів системи.
2. Граничне значення шумів усієї ТПСС.
3. Комбінація якості зображення з шумами системи.

Для ТПСС головні узагальнені характеристики — максимальна дальність виявлення (МДВ) та максимальна дальність розпізнавання (МДР) із заданими ймовірностями виявлення та розпізнавання. Ці характеристики залежать від просторової роздільної здатності; енергетичної роздільної здатності; функції передачі сигналу; передавальної функції; освітленості, еквівалентної шуму; еквівалентної

шуму різниці температур; мінімальної виявлюваної різниці температур; мінімальної роздільної різниці температур; спектрального робочого діапазону; динамічного діапазону.

Сформулюємо визначення цих параметрів і характеристик.

Максимальна дальність виявлення (Maximum Detectable Range – MDR) R_d – це максимальна дальність між ТПСС і стандартним тест-об'єктом, за якої тест-об'єкт виявляється на екрані дисплея із заданою ймовірністю P_d у разі необмеженого часу спостереження.

Максимальна дальність розпізнавання (Maximum Recognizable Range – MRR) R_r – це максимальна дальність між ТПСС і стандартним тест-об'єктом, за якої тест-об'єкт розпізнається на екрані дисплея із заданою ймовірністю P_r у разі необмеженого часу спостереження.

Для ТПСС важливе значення має якість сформованого зображення, яке суб'єктивно визначає спостерігач. Сприймаюча якість одного і того ж зображення істотно відрізняється у різних спостерігачів, а також змінюється у часі для одного спостерігача. Тому якість зображення не можна оцінювати в абсолютних величинах. Існують численні формули для оцінки якості зображення, кожна з яких отримана для конкретних умов спостереження емпіричним шляхом. Усі вони тією чи іншою мірою використовують дві основні характеристики – просторову й енергетичну роздільну здатність [2].

Просторова роздільна здатність оптико-електронної системи спостереження (ОЕСС) характеризує можливість системи розрізняти (розділяти) мінімальні просторові розміри об'єктів і їх елементів. У загальному випадку вона обмежуються дифракцією оптичної системи (ОС), розмірами чутливої площадки (пікселя) і кроком матричного приймача випромінювання (МПВ), шириною частотної смуги пропускання електронного тракту, розділенням монітора. Кожну із

підсистем ТПСС характеризує власна роздільна здатність. Так, роздільну здатність ОС оцінює критерій Релея або функція розсіювання точки (ФРТ). Роздільна здатність МПВ визначається кутовим розміром пікселя, електронного тракту – частотою Найквіста, дисплея – розміром пікселів або числом тепловізійних ліній.

Сучасний підхід до оцінки роздільної здатності ТПСС ґрунтується на теорії лінійної просторової фільтрації, у рамках якої процес спостереження розглядають як просторову фільтрацію об'єкта спостереження багато ланцюговим двовимірним фільтром. Граничне розділення визначають просторовою частотою, на якій МПФ ТПСС зменшується до певного рівня, наприклад, до рівня 0,5.

Енергетична роздільна здатність (контрастна чутливість) характеризує можливість розділення (виявлення) сигналів від об'єктів великих розмірів, розміщених на фоні, за рахунок наявного контрасту. Вона залежить від енергетичних характеристик ОС, чутливості МПВ і шумів системи. Але вона не залежить від просторової роздільної здатності системи.

Чутливість визначається тим мінімальним рівнем сигналу, який може бути зареєстрований приймальною системою. Звичайно це такий вихідний сигнал, який формує на виході МПВ відношення сигнал/шум, що дорівнює одиниці. В ТПСС відношення сигнал/шум SNR_E , що сприймає оператор з екрана дисплея, може перевищувати відношення сигнал/шум SNR_S , яке створює система на екрані монітора. Тому в сучасних ТПСС формується задовільне за якістю зображення на екрані монітора навіть якщо значення SNR_S менші від одиниці.

Максимальна дальність спостереження (МДС) – це максимальна дальність, на якій ТПСС забезпечує виявлення або розпізнавання об'єкта із заданою ймовірністю. Гранична дальність спостереження

залежить одночасно як від просторового, так і від енергетичного розділення.

Якщо ТПСС обмежена просторовим розділенням, то МДС R_m обмежується тільки розмірами об'єкта V_t і граничним кутовим розділенням $\delta\omega_s$, тобто

$$R_m = \frac{V_t}{2\delta\omega_s}. \quad (1.1)$$

У свою чергу, граничне (мінімальне) розділення обмежене дифракційною роздільною здатністю ОС, кроком структури МПВ, телевізійною роздільною здатністю дисплея. В ТПСС з вибіркою зазвичай мінімальне розділення обмежене частотою просторової дискретизації (або частотою Найквіста).

В іншому граничному випадку МДС обмежена енергетичною роздільною здатністю ТПСС. Ця ситуація виникає під час спостереження малоконтрастних об'єктів великих розмірів, тобто коли кутовий розмір об'єкта значно перевищує кутове розділення системи:

$$\frac{V_t}{R} \gg \delta\omega_s. \quad (1.2)$$

Для таких систем головною характеристикою є відношення сигнал/шум, яке визначається на нульовій просторовій частоті як

$$SNR \cong \exp(-\kappa_A R) \frac{\Delta L}{L_n}, \quad (1.3)$$

де ΔL – абсолютний контраст об'єкта; L_n – яскравість, еквівалентна шумовому сигналу системи, приведена до площини об'єкта. У цьому випадку МДС необмежено зростає із збільшенням відношення сигнал/шум.

Таким чином, просторова роздільна здатність однозначно не

визначає МДС або якість зображення, оскільки вона не враховує чутливість системи. Справді, малоконтрастні об'єкти великих розмірів неможливо виявити на дальності, що забезпечує просторове розділення, якщо рівень інформативного сигналу нижче рівня шуму системи.

Передавальна функція $H_s(\nu_x, \nu_y)$ характеризує поведінку ОЕСС в області просторових частот. Її визначає залишковий контраст зображення синусоїдальної міри на екрані дисплея і контраст самої міри. Модуль передавальної функції називають *модуляційною передавальною функцією* (МПФ), (Modulation Transfer Function – MTF) $M_s(\nu_x, \nu_y)$. МПФ залежить від просторових частот ν_x, ν_y і характеризує просторове розділення та якість зображення на екрані дисплея.

Освітленість, еквівалентна шуму (Noise Equivalent Irradiance) NEI – це освітленість у площині вхідної зіниці ОС, яка створює електричний сигнал u_s на виході МПВ, еквівалентний шумовому сигналу u_n , тобто

$$NEI = E_p \frac{u_n}{u_s}, \quad (1.4)$$

де E_p – освітленість вхідної зіниці, яка створює сигнал u_s . Інакше, NEI визначає мінімальну виявлювальну освітленість.

Еквівалентна шуму різниця температур (Noise Equivalent Temperature Difference) $NETD$ – це різниця температур між стандартним тест-об'єктом і фоном, що випромінюють як АЧТ, за якої відношення пікового значення сигналу на виході стандартного еталонного фільтра ТПСС, яка розглядає тест-об'єкт, до шуму дорівнює одиниці [3].

Тест-об'єкт повинен мати кутові розміри $\xi_{tp,x} \times \xi_{tp,y}$, які у декілька разів перевищують кутовий розмір чутливої площадки пікселя МПВ

$\alpha_D \times \beta_D$, щоб вилучити вплив просторового розділення на результати вимірювань. З метою ідентифікації результатів вимірювання (для вилучення впливу електронної системи) використовують стандартний еталонний фільтр з передавальною функцією

$$H_{f,tp}(f) = \left[1 + \left(\frac{f}{f_o} \right)^2 \right]^{-0,5}, \quad (1.5)$$

де $f_o = 1/2t_o$; t_o – час сканування (розкладу) одного елемента зображення.

Під час вимірювання *NETD* використовують формулу

$$NETD = \Delta T \frac{u_n}{u_s}, \quad (1.6)$$

де ΔT – різниця ефективних температур між об'єктом і фоном, що створює сигнал u_s . Середньоквадратичне значення шуму u_n і величину сигналу від тест-об'єкта u_s . визначають з допомогою вольтметра, комп'ютера або осцилографа.

Мінімальна роздільна різниця температур (MRPT – Minimum Resolvable Temperature Difference) *MRTD* – це мінімальна різниця ефективних температур між смугами (штрихами) тест-об'єкта із заданою просторовою частотою та фоном, яка дозволяє візуально на екрані дисплея розділяти (розрізняти) штрихи об'єкта. Тест-об'єкт – це чотириштрихова міра, у якої смуга та проміжки мають однакову ширину $\xi_{tp,x} = \omega_{tp}$, а їх висота дорівнює $\xi_{tp,y} = 7\omega_{tp}$ (рис. 1.1). Смуга та проміжки випромінюють як АЧТ з різною, але постійною температурою. Просторова частота $\nu_x = 1/2\omega_{tp}$ може бути виражена як в лінійних, так і в кутових величинах (найчастіше в мм^{-1} , або в мрад^{-1}).

Спектральний робочий діапазон $\lambda_1 \dots \lambda_2$ визначають на рівні 0,1

відносної спектральної чутливості усієї ТПСС. Для об'єктів з температурами близько 300 К яскравість у діапазоні (8 – 12) мкм у десятки разів більша, ніж у діапазоні (3 – 5) мкм. Як правило, корисний сигнал залежить від контрасту яскравості об'єкта і фону. За температур об'єкта і фону близьких до 300 К контраст у діапазоні (3 – 5) мкм у (2 - 2,5) рази вищий, ніж у діапазоні (8 – 12) мкм [4]. Тому вибір робочого спектрального діапазону неоднозначний і потребує врахування багатьох факторів, у першу чергу типу МПВ.

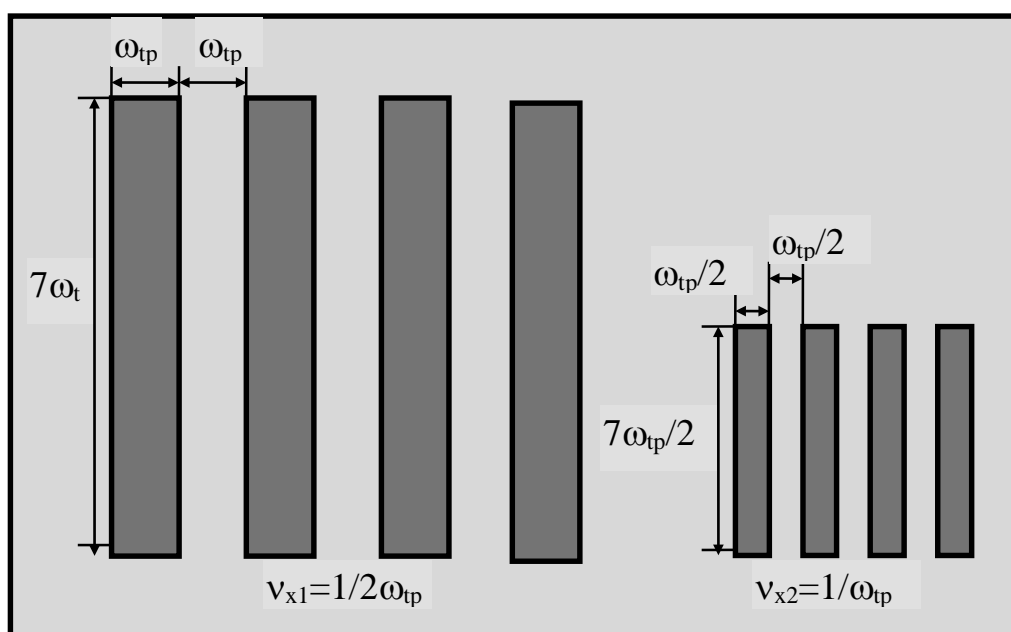


Рис. 1.1 - Тест-об'єкт (міра Фуко) для визначення $MRTD(v_x)$

Динамічний діапазон ТПСС визначають зазвичай відношенням максимального сигналу $L_{tS, \max}$ до шумового сигналу L_{nS} . В децибелах він дорівнює

$$N_{db} = 20 \lg \frac{L_{tS, \max}}{L_{nS}}. \quad (1.7)$$

Таким чином, наведені матеріали свідчать про те, що ні просторове

розділення, ні енергетичну чутливість не можна використовувати як єдиний параметр для оцінки ефективності ОЕСС.

1.2 Максимальна дальність спостереження ТПСС

Загальне визначення максимальної дальності виявлення (МДВ) і максимальної дальності розпізнавання (МДР) було дано в п.1.1. Існують різні методи розрахунку цієї дальності, в основі яких лежить визначення відношення сигнал/шум SNR на виході МПВ [5, 6]. Це значно ускладнює споживачам можливість порівнювати характеристики різних ТПСС.

Для визначення МДВ і МДР необхідно, перш за все, вказати тип об'єкта (цілі) і фону та їх характеристики, стан атмосфери, а також ймовірність виявлення P_d і розпізнавання P_r . Під час порівняння дальності дії різних ТПСС дуже важливо, щоб ці характеристики були однаковими.

У монографії [4] було розглянуто методи розрахунку МДС, коли об'єкт спостереження міститься на фоні, який не випромінює, рівномірно випромінює, нерівномірно випромінює. У кожному із наведених випадків вихідними для розрахунку МДС є дані про ОС, приймач випромінювання (ПВ), стан атмосфери, а також просторові й енергетичні характеристики об'єкта і фону. Максимальна дальність дії у цих методах визначається як найбільша відстань між ТПСС і об'єктом, за якої потік випромінювання від об'єкта забезпечує на виході ПВ необхідне відношення сигнал/шум SNR_d . При цьому величина SNR_d визначається ймовірністю виявлення об'єкта R_d при заданій ймовірності помилкових тривог P_{fa} . Однак ці методи не враховують перетворення сигналу в електронному тракті і дисплеї, а також закони зорового сприйняття зображення.

Для знаходження МДВ об'єкта малих розмірів за допомогою пасивних ТПСС іноді використовують рівняння

$$\Delta E_p(R_d) = SNR_d NEI, \quad (1.8)$$

де $\Delta E_p(R_d)$ – перевищення енергетичної освітленості вхідної зіниці ОС, утвореної випромінюванням від об'єкта, над освітленістю, утвореною випромінюванням від фону; NEI – освітленість, еквівалентна шуму (див. п. 1.1).

У методі, поданий у статті [7], МДВ визначається як відстань до об'єкта, розміщеного на рівномірному фоні, за якої тепловий контраст об'єкта з урахуванням розсіювання і поглинання в атмосфері забезпечує виявлення оператором зображення об'єкта на екрані дисплея із заданою ймовірністю без урахування пошуку зображення. У цій же методиці гранична дальність розпізнавання об'єкта R_r визначається як відстань до об'єкта, за якої тепловий контраст об'єкта забезпечує оператору виявлення на екрані дисплея зображення однієї смуги еквівалентного тест-об'єкта і розділення потрібної кількості смуг, що визначається ймовірністю розпізнавання P_r .

У статті [8] викладено загальну методику розрахунку дальності дії ТПСС. Для розрахунку МДС оператор фіксує критичний розмір об'єкта, що спостерігається, температури об'єкта і фону, метеорологічні умови. Відповідно до критерію Джонсона [3] задається потрібне число смуг тест-об'єкта на критичний розмір об'єкта і розраховується мінімальна роздільна різниця температур $MRTD$, що відповідає різним штриховим мірам з урахуванням спектрального коефіцієнта пропускання атмосфери для кожної дальності. Максимальна дальність розпізнавання визначається як дальність, для якої значення $MRTD$ збігається з різницею температур між об'єктом і фоном. Для визначення МДВ за цією методикою аналогічним чином

використовується *MDTD*.

У підручнику [9] запропоновано метод розрахунку МДС ТПСС, в основі якого лежить така важлива характеристика тепловізорів, як температурне розділення. Із п. 1.1 випливає, що температурне розділення тепловізорів визначається трьома температурами: *NETD*, *MDTD* і *MRTD*.

Відповідно до цих температур пропонується використовувати для ТПСС такі МДС:

1. *Максимальна дальність дії* (МДД) *NER* (Noise Equivalent Range) R_n – це відстань між ТПСС і тест-об'єктом, що випромінює як АЧТ, за якої відношення пікового значення сигналу до середньоквадратичного значення шуму на виході еталонного фільтра дорівнює одиниці.

2. *Максимальна дальність виявлення* R_d – це максимальна відстань між ТПСС і тест-об'єктом, що випромінює як АЧТ, за якої оператор виявляє зображення тест-об'єкта на екрані дисплея із заданою ймовірністю P_d , якщо час спостереження необмежений.

3. *Максимальна дальність розпізнавання* – це максимальна відстань між ТПСС і тест-об'єктом у вигляді міри Фуко, що випромінює як АЧТ, за якою оператор розділяє штрихи у зображенні міри на екрані дисплея із заданою ймовірністю P_r . В основі метода розрахунку МДР лежить *MRTD* і критерій Джонсона, відповідно до якого для розпізнавання об'єкта необхідно, щоб уздовж його критичного (найменшого) розміру розміщувалась визначена кількість штрихів міри Фуко, яка залежить від ймовірності розпізнавання.

1.3 Стандарт НАТО для розрахунку максимальної дальності спостереження ТПСС

У 1995 році організація Північноатлантичної Договору (НАТО) прийняла угоду 4347 про стандартизацію для сухопутних сил «Визначення номінальних характеристик статичної дальності для систем інфрачервоного спостереження» [10].

У стандарті НАТО 4347 визначено статичні характеристики дальності дії ТПСС у разі відсутності пошуку, коли об'єкт знаходиться в полі зору системи, а оператор має необмежений час для виявлення об'єкта. Стандарт стосується тільки тих ТПСС, які відповідають характеристикам МРРТ і застосовується для наземних цілей. Використовуються спектральні діапазони (3 – 5), (8 – 14) мкм або частина цих діапазонів.

Країни, що беруть участь в угоді за стандартом 4347, дали згоду використовувати такі дальності дії:

- номінальна статична дальність виявлення, км;
- номінальна статична дальність розпізнавання, км;
- номінальна статична дальність ідентифікації, км.

Для кожної дальності слід указувати умови пропускання атмосфери (добрі чи обмежені), поле зору системи (у градусах або мілірадіанах), а також спосіб отримання МРРТ (вимір або розрахунок). Залежно від типу системи може застосовуватись одна або дві з наведених вище видів дальності.

Номінальні значення статичної дальності для ТПСС визначаються на основі усередненої МРРТ і за таких умов:

- розмір об'єкта – $V_t \times W_t = 2,3 \times 2,3 \text{ м}^2$;
- температурний контраст між об'єктом і заднім фоном (відносно температури АЧТ в 288 К) – $\Delta T_o = 2 \text{ К}$;

– коефіцієнт пропускання атмосфери в межах робочого спектрального діапазону визначається законом Бугера:

$$\tau_A(R) = \exp(-\kappa_A R), \quad (1.9)$$

де R – дальність, км; $\kappa_A = 0,2 \text{ км}^{-1}$ – показник ослаблення для сприятливих умов пропускання атмосфери; $\kappa_A = 1,0 \text{ км}^{-1}$ – показник ослаблення для обмежених умов пропускання атмосфери;

- критерії розділення для ймовірності 50 %:
- виявлення – 1 пара ліній /об’єкт;
- розпізнавання – 3 пари ліній/об’єкт;
- ідентифікація – 6 пар ліній/об’єкт.

Зміна початкового температурного контрасту ΔT_o між об’єктом і заднім фоном унаслідок ослаблення випромінювання в атмосфері враховується як

$$\Delta T(R) = \Delta T_o \exp(-\kappa_A R). \quad (1.10)$$

Через експонентне зменшення коефіцієнта пропускання атмосфери на графіку $\ln[\Delta T(R)]$ наносять дві похилі лінії для різних коефіцієнтів ослаблення. Відповідні номінальні статичні відстані містяться на перетинанні графіків $\ln[\Delta T(R)]$ і відповідних функцій $\ln[MRTD(\nu_x)]$.

1.4 Вплив атмосфери на дальність спостереження

При проходженні через атмосферу інфрачервоне випромінювання послабляється й спотворюється. Оскільки дальність дії ТПСС звичайно становить одиниці кілометрів, а випромінювання є некогерентним, те досить розглядати тільки ослаблення. Ослаблення інфрачервоного випромінювання залежить від трьох явищ:

- поглинання молекулами атмосферних газів;
- розсіювання на молекулах, аерозолях і частках, що є присутніми в атмосфері;
- ослаблення за рахунок так званих гідрометеорів (туману, дощу, снігу).

Причому поглинання й розсіювання випромінювання молекулами газів і частками є завжди, тоді як ослаблення за рахунок гідрометеорів залежить від погодних умов.

Проходження випромінювання через атмосферу описують за допомогою:

- *спектрального коефіцієнта пропускання $\tau_A(\lambda)$ і ослаблення $\kappa_A(\lambda)$* , які зв'язані між собою законом Бугера-Ламберта-Бера

$$\tau_A(\lambda) = \Phi_e(\lambda, d) / \Phi(\lambda, 0) = \exp[-\kappa_A(\lambda)d], \quad (1.11)$$

де d - відстань між об'єктом спостереження й ТПСС;

- *середнього коефіцієнта пропускання*

$$\overline{\tau_A} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) d\lambda, \quad (1.12)$$

де $(\lambda_1 - \lambda_2)$ - робочий спектральний діапазон;

- *інтегрального коефіцієнта пропускання*

$$\tau_A^i = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_e(\lambda, 0) \tau_A(\lambda, d) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_e(\lambda, 0) d\lambda}, \quad (1.13)$$

де $\Phi_e(\lambda, 0)$ - спектральний потік випромінювання від об'єкта та фону.

Іноді для оцінки ослаблення використовують поняття *оптичної товщі атмосфери* $d_{оп}(\lambda) = \kappa_A(\lambda)d$ і *загасання*, яке вимірюють у децибелах:

$$\eta(\lambda) = 10 \kappa_A(\lambda) l_{ge} = 4,34 \kappa_A(\lambda).$$

Поглинання інфрачервоного випромінювання в широких смугах із

центрами в зазначених нижче довжинах хвиль здійснюється молекулами:

- води (2,7; 3,2; 6,3 мкм);
- вуглекислого газу (2,7; 4,3; 15 мкм);
- озону (4,8; 9,6; 14,2 мкм);
- закису азоту (4,7; 7,8 мкм);
- окису вуглецю (4,8 мкм);
- метану (3,2; 7,8 мкм).

Не беручи до уваги ослаблення в щільних дисперсних середовищах, молекулярне поглинання є головною причиною ослаблення випромінювання, причому найбільш сильне випромінювання поглинається парами води, вуглекислим газом і озоном. У нижніх шарах атмосфери поглинанням закисом азоту й окисом вуглецю звичайно можна знехтувати.

У верхніх шарах атмосфери, де зміст пари води є незначним, слід урахувати поглинання теплового випромінювання озоном, окисом вуглецю й іншими газами. Основна частина атмосферного озону перебуває в шарі атмосфери на висоті від 10 до 40 км із найбільшою концентрацією в діапазоні висот 20-30 км. Цей шар поглинає випромінювання головним чином в області 9,6 мкм зі слабкими смугами поглинання на 4,7 мкм і 14,2 мкм.

Отже, поглинання випромінювання формує вікна прозорості атмосфери (0,4 - 1,1); (1,2 - 1,3); (2,1 - 2,5); (3,5 - 5); (8 - 14) мкм. Смуги поглинання водяної пари із центром 6,3 мкм і вуглекислого газу із центрами 2,7 мкм і 15 мкм обмежують пропускання випромінювання атмосферою в діапазоні довжин хвиль (2 - 20) мкм, визначаючи положення двох вікон прозорості: (3,5 - 5) мкм і (8 - 14) мкм.

На проходження випромінювання у вікнах пропускання атмосфери основний вплив виявляють розсіювання й ослаблення за рахунок гідрометеорів. Таким чином, загальний спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери визначається добутком

$$\tau_A(\lambda) = \tau_m(\lambda)\tau_s(\lambda)\tau_{rs}(\lambda), \quad (1.14)$$

де $\tau_m(\lambda)$, $\tau_s(\lambda)$, $\tau_{rs}(\lambda)$ - спектральні коефіцієнти пропускання атмосфери, обумовлені поглинанням, розсіюванням і ослабленням за рахунок гідрометеорів відповідно. Типовий графік спектрального коефіцієнта пропускання атмосфери на горизонтальних трасах наведено на рис. 1.2 [11].

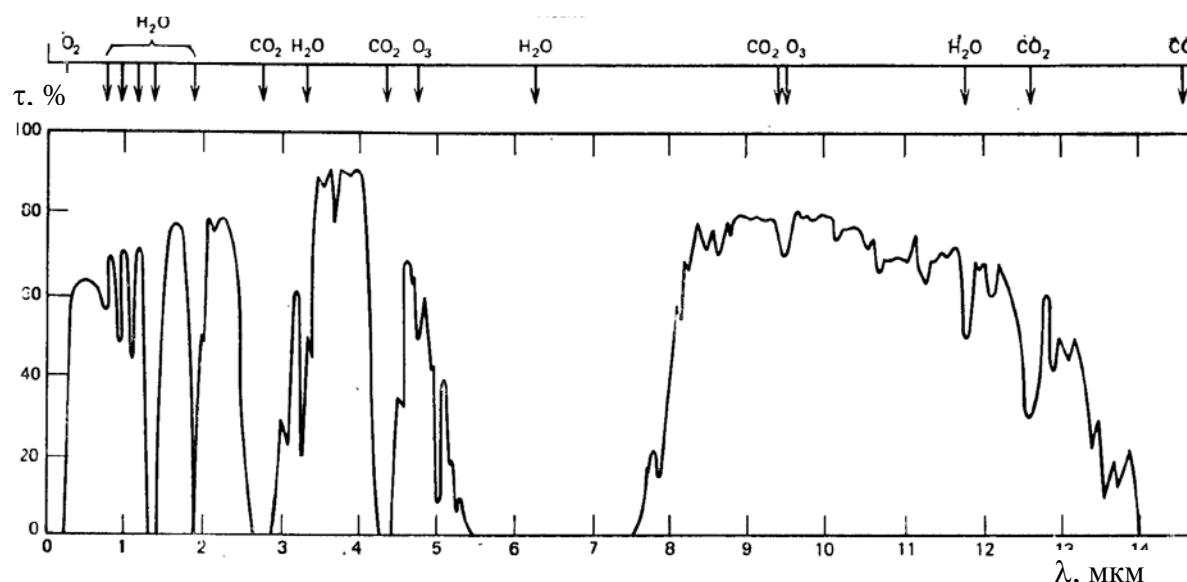


Рис. 1.2 – Типовий графік спектрального коефіцієнта пропускання атмосфери

Розрахунки за формулою (1.14) можна виконувати користуючись спрощеними моделями атмосфери, або більш точно з допомогою спеціального програмного забезпечення. Розглянемо перший шлях.

Спектральний коефіцієнт пропускання $\tau_m(\lambda)$ як сказано вище в більшості випадків визначається поглинанням парами води та вуглекислим газом:

$$\tau_m(\lambda) = \tau_{H_2O}(\lambda)\tau_{CO_2}(\lambda). \quad (1.15)$$

Молекулярне розсіювання та розсіювання на різних частинках, присутніх в атмосфері: пил, дим, аерозолі, крапельки води можуть бути розраховані за допомогою теорії Мі [12]. Ця теорія показує, що якщо розмір молекули або частинки значно менший від довжини хвилі, то спостерігається релєєвське селективне розсіювання, що є пропорціональним λ^{-4} . Для частинок, розміри яких більші від довжини хвилі, спостерігається неселективне розсіювання. Цим можна пояснити невелику дальність дії ОЕСС видимого та ІЧ діапазонів за наявності дощу і хорошу видимість тепловізійних каналів при значному задимленні (рис. 1.3).



а)



б)

Рис. 1.3 – Зображення телевізійного (а) та тепловізійного (б) каналів ОЕСС за наявності диму

Для орієнтовних розрахунків спектрального коефіцієнта пропускання $\tau_s(\lambda)$ можна виходити з відомого зв'язку між метеорологічною дальністю бачення d_v й пропусканням.

Концепція метеорологічної оптичної дальності введена Міжнародною комісією з освітленості оскільки вона досить об'єктивно характеризує оптичний стан атмосфери. Метеорологічна дальність бачення є частковим випадком оптичної дальності видимості. Вона

однозначно пов'язана із прозорістю атмосфери й не залежить у явному виді від яскравості неба, зокрема від положення Сонця на небі. Отже, метеорологічна дальність бачення може повністю характеризувати оптичні властивості атмосфери. Уночі метеорологічна дальність бачення визначається по еталонних вогнях і дорівнює денній при тому ж пропусканні атмосфери.

Метеорологічну оптичну дальність можна обчислити за формулою Кошмидера:

$$\text{MOR} = d \cdot \frac{\ln \gamma}{\ln \tau}. \quad (1.16)$$

де γ - значення порогу контрастної чутливості ока (в різних методиках це значення приймають рівним від 0,02 до 0,05; τ – виміряне значення коефіцієнта пропускання атмосфери на відстані d).

Метеорологічну дальність бачення легко зв'язати з коефіцієнтом ослаблення.

Так, як пороговий контраст зорової системи спостерігача в формулі (1.16) дорівнює γ , то фактично d_v - це відстань, на якій об'єкт з одиничним контрастом $C_v(0)=1$ після проходження атмосфери сприймається з контрастом $C_v(d_v) = \gamma$, тобто

$$C_v(d_v) = C_v(0)\exp(-\kappa_A d_v) = \gamma. \quad (1.17)$$

Звідси

$$\kappa_s = \frac{1}{d_v} \ln \frac{C_v(d_v)}{C_v(0)} = \frac{\ln C_v(d_v)}{d_v}. \quad (1.18)$$

$$\text{Якщо } \gamma = 0,05, \text{ то } \kappa_s = \frac{3}{d_v}, \text{ а якщо } \gamma = 0,05, \text{ то } \kappa_s = \frac{3,91}{d_v}.$$

Вказані вище методики розрахунків є оціночними. На практиці найчастіше для обчислення коефіцієнта пропускання атмосфери з врахуванням поглинання, розсіювання та власного випромінювання використовуються кілька комп'ютиризованих розрахункових моделей.

Найвідомішими серед них є американські моделі Lowtran (Low Resolution Transmission), Modtran (MODerate resolution atmospheric TRANsmission), Hitran (High Resolution Transmission) [13]. Ці моделі засновані на великій кількості експериментальних даних і дозволяють з необхідною точністю визначати коефіцієнти пропускання на різноманітних трасах.

1.5 Порівняльний аналіз різних методів розрахунку дальності виявлення і розпізнавання

Аналіз розглянутих вище методів визначення МДС свідчить про велике їх різноманіття, що ускладнює порівняльний аналіз різних ТПСС на стадіях проектування, дослідження і застосування. У методах розрахунку МДД, викладених в [7, 8], найповніше враховується перетворення сигналу і шуму від об'єкта до оператора. Ці методики мають багато спільного, тому що базуються на температурному розділенні ТПСС, а ослаблення випромінювання атмосферою в них описується законом Бугера (1.9).

У підручнику [9] наведено методику, засновану на еквівалентній шуму різниці температур, мінімальній виявлювальній різниці температур і мінімальній роздільній різниці температур. Отримані відносно прості рівняння для розрахунку МДВ і МДР дозволяють аналізувати й оптимізувати ТПСС.

У методі [8] більш повно враховується електронна обробка відеосигналу. Однак отримані співвідношення досить складні і вимагають спеціальних програм для розрахунку дальності дії ТПСС, що ускладнює їх практичне застосування.

Стандарт НАТО 4347 досить чітко і відносно просто визначає дальність спостереження ТПСС, однак у ньому не визначена процедура одержання функції $MRTD(v_x)$. Це було головною причиною, що

змусила Данію не ратифікувати цей стандарт.

На сучасному етапі розвитку оптико-електронного приладобудування дуже важливо, щоб створювані нові прилади і системи відповідали міжнародним стандартам. У зв'язку з цим автори пропонують як максимальну дальність спостереження ТПСС використовувати розв'язок рівняння

$$\Delta T_o \exp(-\kappa_A R) = MRTD(v_x). \quad (1.19)$$

Це рівняння ґрунтується на стандарті NATO 4347 і методі розрахунку МДС ТПСС, запропонованому у підручнику [9]. У рівнянні (1.11) просторову частоту v_x визначають відповідно до стандарту NATO 4347 у такий спосіб:

- для розрахунку МДВ цілі R_d , мрад⁻¹:

$$v_{xd} = \frac{R_d}{V_t}; \quad (1.20)$$

- для розрахунку МДР цілі R_r , мрад⁻¹:

$$v_{xr} = \frac{3R_r}{V_t}; \quad (1.21)$$

- для розрахунку максимальної дальності ідентифікації R_i , мрад⁻¹:

$$v_{xi} = \frac{6R_i}{V_t}, \quad (1.22)$$

де V_t – критичний (найменший) розмір цілі. При цьому функція $MRTD(v_x)$ може бути розрахована за формулою [4]

$$MRTD(v_x) = \frac{0,66 SNR(P_r) NETD v_x}{M_s(v_x)} \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{\Delta f t_o f_f t_E}}, \quad (1.23)$$

Після підстановки (1.23) в (1.19) одержимо рівняння для

розрахунку МДД ТПСС

$$\Delta T_0 \exp(\kappa_A R) = 0,66 \cdot SNR(P_r) \cdot NETD \frac{v_x}{M_s(v_x)} \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{\Delta f \cdot t_o f_f t_E}}. \quad (1.24)$$

1.6 Приклад розрахунку максимальної дальності спостереження

Як приклад застосування запропонованого методу розрахунку максимальної дальності виявлення, розпізнавання та ідентифікації розглянемо нічний канал танкового прицілу з тепловізійною камерою Catherine-FC французького виробництва [14] (рис. 1.4). Камера має компактну конструкцію і призначена спостереження фоновоцільової обстановки на великих відстанях шляхом використання її в тепловізійних каналах танкових прицільних комплексів ПТТ-2 і ПНК-6. Можливо також її застосування у складі іншої військової техніки.

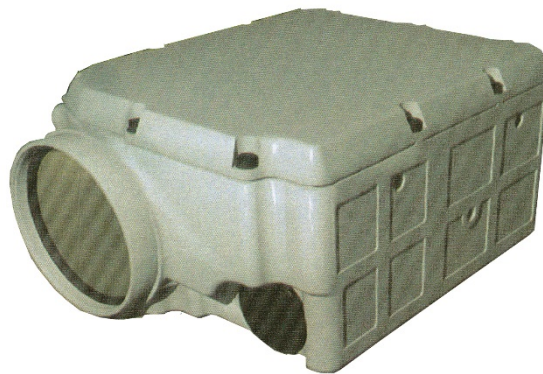


Рис. 1.4 - Тепловізійна камера Catherine-FC

Повна інформація про характеристики цієї камери відсутня. Тому були використані із рекламних проспектів фірми Thales тільки ті характеристики камери, які необхідні для розрахунку максимальної дальності спостереження:

- 1) Робочий спектральний діапазон (7,5 – 10,5) мкм (або (7,7 – 10,3) мкм);

- 2) Кутове поле зору: широке поле зору (ШПЗ) $2\omega_x \times 2\omega_y = 9^\circ \times 6,7^\circ$; вузьке поле зору (ВПЗ) $2\omega_x \times 2\omega_y = 3^\circ \times 2,2^\circ$;
- 3) Максимальна дальність спостереження за стандартом НАТО 4347 при ВПЗ: виявлення $R_d = 8,3$ км; розпізнавання $R_r = 3,3$ км; ідентифікації $R_i = 1,8$ км;
- 4) Еквівалентна шуму різниця температур $NETD = 180$ мК;
- 5) Модуляційна передавальна функція в центрі поля зору дорівнює: для ШПЗ – 27%; для ВПЗ – 80%;
- 6) Наявність телескопічної насадки із збільшенням $1,5^\times$;
- 7) Наявність електронного збільшення 2^\times ;
- 8) Формат кадру $p_D \times q_D = 754 \times 576$;
- 9) Частота кадрів $f_f = 100$ Гц;
- 10) Приймач випромінювання – лінійка SOFRADIR IRCCD 288x4 (ID TL061-XX): розмір пікселя $v_D \times w_D = 25 \times 28$ мкм; відстань між пікселями уздовж сканування $V_D = 43$ мкм.

Розрахунок максимальної дальності дії камери Catherine-FC.

Використаємо рівняння (1.24), яке ґрунтується на стандарті НАТО 4347

$$\Delta T_0 \exp(\kappa_A R) = 0,66 \cdot SNR(P_r) \cdot NETD \frac{v_x}{M_s(v_x)} \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{\Delta f \cdot t_o f_f t_E}}.$$

Так як тепловізор має два поля зору – вузьке і широке, то визначимо параметри рівняння (1.24) для цих полів зору.

Вузьке поле зору.

1. Із стандарту НАТО і проспектів відомими параметрами є: $\Delta T_0 = 2$ К; $\kappa_A = 0,2 \text{ км}^{-1}$ (або $1,0 \text{ км}^{-1}$); $NETD = 0,18$ К; $f_f = 100$ Гц; $t_E = 0,2$ с.
2. Відношення сигнал/шум SNR_r для надійного виявлення одного штриха міри Фуко приймемо рівним 4,5 [4].
3. Визначимо кутові розміри пікселя ПВ. Кутовий розмір періоду

матричного ПВ знаходимо як $\alpha_D = 2\omega_x/p_D = 0,07$ мрад, де $2\omega_x = 3^0$ – поле зору; $p_D = 754$ – число елементів розкладу зображення уздовж вісі x . Аналогічно визначаємо кутовий розмір пікселя уздовж вісі y – $\beta_D = 0,067$ мрад.

4. Із проспекту відомо тільки одне значення МПФ тепловізора $M_s(v_{x0}) = 0,8$. Зазвичай значення МПФ визначається на частоті Найквіста $v_N = v_{x0} = 1/2\alpha_D = 7,2$ мрад⁻¹. Будемо апроксимувати МПФ тепловізора функцією Гауса [3, 4]

$$M_s(v_x) = \exp(-2\pi^2 r_s^2 v_x^2), \quad (1.25)$$

де радіус кружка розсіювання r_s знаходимо із умови

$$\exp(-2\pi^2 r_s^2 v_N^2) = 0,8. \quad (1.26)$$

Із рівняння (1.26) знаходимо, що $r_s = 1,5 \cdot 10^{-2}$ мрад. Тоді МПФ (1.25) матиме вигляд:

$$M_s(v_x) = \exp(-4,3 \cdot 10^{-3} v_x^2). \quad (1.27)$$

5. Якщо ефективна шумова смуга пропускання електронної системи Δf узгоджена з часом формування одного елемента зображення t_o , то справедливе співвідношення $\Delta f \cdot t_o = \pi/4$ [4].

6. Підставимо вихідні параметри в рівняння (1.24) з врахуванням просторових частот (1.20) – (1.22) для різних МДС.

6.1. Для виявлення цілі просторова частота (1.20) визначається як $v_{xd} = R_d/2,3$ мрад⁻¹, де дальність R_d визначена в км. При цьому МПФ (1.27) матиме вигляд $M_s(R_d) = \exp(-8,13 \cdot 10^{-4} R_d^2)$. Тоді рівняння (1.24) можна записати як

$$2 \exp(-0,2 R_d) = 0,66 \cdot 4,5 \cdot 0,18 \times \frac{R_d}{2,3 \exp(-8,13 \cdot 10^{-4} R_d^2)} \sqrt{\frac{0,07 \cdot 0,078}{\pi/4 \cdot 100 \cdot 0,2}}.$$

Представимо це рівняння у вигляді

$$R_d \exp(8,13 \cdot 10^{-4} R_d^2 + 0,2 R_d) = 497.$$

Розв'язуючи це трансцендентне рівняння методом послідовних наближень, визначаємо максимальну дальність виявлення $R_d = 15,9$ км.

6.2. Для розпізнавання цілі просторова частота (1.21) і МПФ (1.27) визначаються як $\nu_{xr} = 3R_r/2,3$ і $M_s(R_r) = \exp(-7,3 \cdot 10^{-3} R_r^2)$.

Тоді рівняння (1.24) можна записати як

$$R_r \exp(7,3 \cdot 10^{-3} R_r^2 + 0,2R_r) = 166.$$

Розв'язком цього рівняння є максимальна дальність розпізнавання $R_r = 10,2$ км.

Для обмежених погодних умов рівняння (1.24) матиме вигляд:

$$R_r \exp(7,3 \cdot 10^{-3} R_r^2 + R_r) = 166.$$

Розв'язком цього рівняння є максимальна дальність розпізнавання $R_r = 3,8$ км.

6.3. Для ідентифікації цілі просторова частота (1.22) і МПФ (1.27) визначаються як $\nu_{xi} = 6R_i/2,3$ і $M_s(R_i) = \exp(-7,3 \cdot 10^{-3} R_i^2)$.

Тоді рівняння (1.24) можна записати як

$$R_i \exp(-2,9 \cdot 10^{-2} R_i^2 + 0,2R_i) = 78.$$

Розв'язком цього рівняння є максимальна дальність ідентифікації $R_i = 6,5$ км.

Широке поле зору

1. Параметри для ШПЗ, що наведені в пунктах 1, 2, 3 і 5 для УПЗ, залишаються незмінними.

2. Кутовий розмір періоду матричного ПВ знаходимо як $\alpha_D = 2\omega_x/p_D = 0,21$ мрад, де $2\omega_x = 9^\circ$ – поле зору; $p_D = 754$ – число елементів розкладу зображення уздовж вісі x . Аналогічно визначаємо кутовий розмір пікселя уздовж вісі y – $\beta_D = 0,21$ мрад.

3. Визначимо МПФ (1.27) на частоті Найквіста $\nu_N = 1/2 \alpha_D = 2,4$ мрад⁻¹, де радіус кружка розсіювання знаходимо із умови

$$\exp(-2\pi^2 r_s^2 v_N^2) = 0,27. \quad (1.28)$$

Із рівняння (1.28) знаходимо, що $r_s = 0,1$ мрад. Тоді МПФ (1.27) матиме вигляд:

$$M_s(v_x) = \exp(-0,22v_x^2). \quad (1.29)$$

4. Широке поле зору використовується, як правило, для виявлення цілі. При цьому МПФ (1.27) для просторової частоти залежить $v_{xd} = R_d/2,3$ від МДВ як: $M_s(R_d) = \exp(-0,04R_d^2)$. Тоді рівняння (1.24) запишеться як

$$2 \exp(-0,2R_d) = 0,66 \cdot 4,5 \cdot 0,18 \times \frac{R_d}{2,3 \exp(-0,04R_d^2)} \sqrt{\frac{0,21 \cdot 0,21}{\pi / 4 \cdot 100 \cdot 0,2}}.$$

Представимо це рівняння у вигляді

$$R_d \exp(0,04R_d^2 + 0,2R_d) = 162.$$

Розв'язком цього рівняння є максимальна дальність виявлення $R_d = 6,8$ км.

5. Для обмежених погодних умов рівняння (1.24) матиме вигляд:

$$R_d \exp(0,04R_d^2 + R_d) = 162.$$

Розв'язком цього рівняння є максимальна дальність виявлення $R_d = 3,5$ км.

Програма розрахунку максимальної дальності виявлення, розпізнавання та ідентифікації запропонованим методом в середовищі Mathcad для різних тепловізійних систем подана в кінці розділу 1.

Аналіз результатів

Чисельні значення максимальної дальності виявлення $R_d = 15,9$ км, розпізнавання $R_r = 10,2$ км та ідентифікації $R_i = 6,5$ км, отримані запропонованим методом для вузького поля зору, перевершують дані проспектів. Це можна пояснити наступними причинами:

- виробники тепловізора Catherine-FC стверджують, що розраховані дальності дії за методикою фірми Thales на 40% нижче експериментальних даних, що свідчить про деякі неточності в їх методиці розрахунку МДД;
- рекламні дані відносно величини МПФ тепловізора $M_s = 0,8$ очевидно є завищеними.

В той же час розрахована дальність виявлення $R_d = 6,8$ км в широкому полі зору близька до значення, яке наведено у проспекті про тепловізор Catherine-FC.

Збільшити максимальну дальність спостереження, а значить і підвищити ефективність прицільного комплексу, можна завдяки застосуванню телескопічної насадки з кутовим збільшенням Γ_t . На рис.1.5 наведена залежність максимальної дальності виявлення в широкому полі зору від кутового збільшення телескопічної насадки Γ_t , яка отримана в результаті дослідження рівняння (1.24).

При застосуванні телескопічної насадки необхідно враховувати такі фактори:

1) Із ростом збільшення насадки Γ_t зменшується поле зору тепловізора $2\omega'_x = 2\omega_x/\Gamma_t$. Це може призвести до пропуску цілі, тобто до зменшення ефективності прицільного комплексу;

2) При визначення функції $R_d(\Gamma_t)$ нами не враховувалися енергетичні втрати випромінювання в насадці, які призводять до зменшення МДВ;

3) Чим більше збільшення Γ_t , тим вищі вимоги до системи стабілізації візирної осі прицілу. Це призводить до збільшення габаритів і вартості самого прицілу.

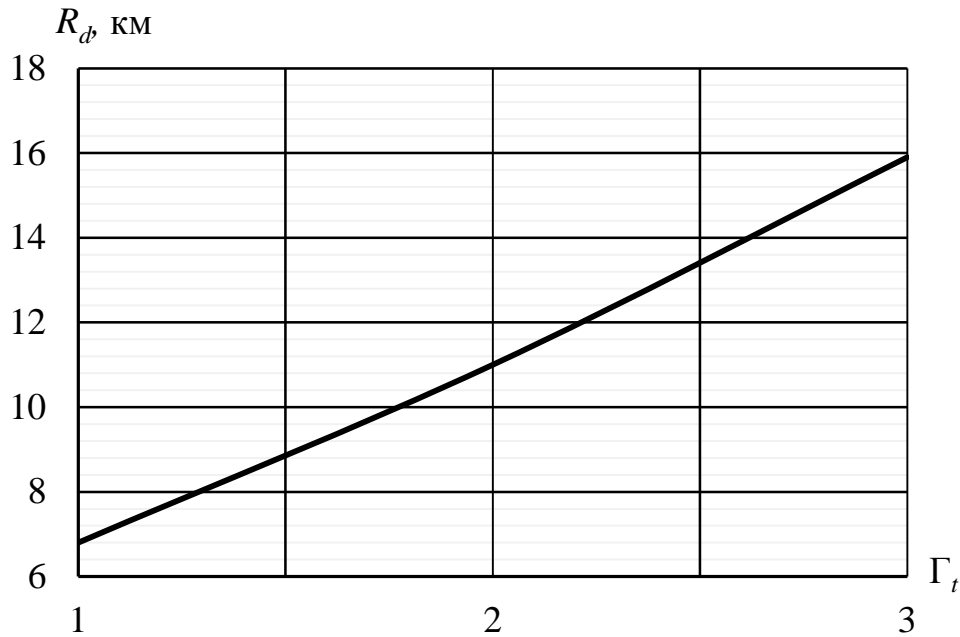


Рис. 1.5 - Залежність максимальної дальності виявлення R_d від кутового збільшення телескопічної насадки Γ_t ,

Таким чином, розроблений метод розрахунку максимальної дальності виявлення, розпізнавання та ідентифікації дозволив проаналізувати можливості тепловізора Catherine-FC.

Використання телескопічної насадки дозволяє збільшити МДД тепловізора. Однак при цьому необхідно враховувати зменшення поля зору і підвищені вимоги до стабілізації візирної осі прицілу.

1.7 Загальне рівняння для розрахунку максимальної дальності дії тепловізійної системи спостереження

Рівняння (1.24) для розрахунку МДД ТПСС має кілька істотних недоліків:

1) просторові частоти, зумовлені співвідношеннями (1.20) – (1.22), справедливі тільки для 50 %-ої ймовірності виявлення, розпізнавання та ідентифікації відповідно;

2) відношення сигнал/шум SNR_r – це функція ймовірності виявлення штриха еквівалентної міри Фуко.

У зв'язку з цим застосування рівняння (1.24) обмежене тільки 50 %-ю ймовірністю.

Для растрового зображення в монографії [3] запропоновано емпіричну формулу для ймовірності розпізнавання об'єкта

$$P_r = 1 - \exp \left[-0,018 (N_l + 1)^2 \right], \quad (1.30)$$

де N_l – число рядків (елементів розкладу) уздовж критичного розміру об'єкта. З формули (1.30) легко визначити кількість рядків, що відповідає заданій ймовірності розпізнавання

$$N_l = 7,45 \sqrt{-\ln(1 - P_r)} - 1. \quad (1.31)$$

Наприклад, для ймовірності розпізнавання $P_r = 50\%$ число рядків $N_l = 6$ або три пари ліній/об'єкт, що відповідає стандарту НАТО 4347. Для ймовірності розпізнавання $P_r = 90\%$ число рядків $N_l = 10$. Відповідно до стандарту НАТО 4347 для виявлення цілі потрібна одна пара рядків на критичний розмір об'єкта, тобто $N_l = 2$. Тоді з формули (1.30) випливає, що виявлення цілі відповідає її розпізнаванню з ймовірністю $P_r = 15\%$.

Просторова частота тест-об'єкта, що відповідає ймовірності розпізнавання P_r , дорівнює

$$v_{xr} = \frac{N_l R_r}{2V_t} = \frac{R_r}{2V_t} \left[7,45 \sqrt{-\ln(1 - P_r)} - 1 \right], \quad (1.32)$$

де $V_t = l_{cr}$ – критичний розмір об'єкта.

Одержимо формулу для розрахунку $MRTD(v_x)$, що враховувала б залежність просторової частоти розпізнавання v_{xr} і відношення сигнал/шум SNR_r від ймовірності розпізнавання P_r . Для цього визначимо з формули (1.24) температурний контраст тест-об'єкта як

$$\Delta T = MRTD(v_x) = \frac{0,466 SNR(P_r) NETD}{M_s(v_x)} \sqrt{\frac{k_{\Delta f} \beta_D}{f_f t_E \omega_{tp}}}, \quad (1.33)$$

де еквівалентна шуму різниця температур $NETD$ визначається за формулою [4]

$$NETD = \frac{4k_{eff}^2}{\tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda} \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}}, \quad (1.34)$$

де k_{eff} – ефективне діафрагмове число; τ_o – інтегральний коефіцієнт пропускання інфрачервоного об'єктива; $D^*(\lambda)$ – питома виявлювальна здатність приймача випромінювання; $M_\lambda(\lambda, T)$ – функція Планка; A_D – площа пікселя.

З урахуванням співвідношень [4]

$$k_{\Delta f} = \frac{v_x \alpha_D}{t_o \Delta f} \text{ і } \omega_{tp} = \frac{1}{2v_x}, \quad (1.35)$$

рівняння (1.33) запишемо у вигляді

$$MRTD(v_x) = \frac{0,66 SNR(P_r) NETD v_x}{M_s(v_x)} \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{\Delta f t_o f_f t_E}}. \quad (1.36)$$

Підставимо тепер (1.34) в (1.36):

$$MRTD(v_x) = \frac{0,66 SNR(P_r) v_x}{M_s(v_x)} \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{A_D t_o f_f t_E}} \frac{4k_{eff}^2}{\tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda}. \quad (1.37)$$

Для об'єктів, що перебувають на великій відстані від ТПСС ($R \gg f'_o$), справедливим є співвідношення

$$4k_{eff}^2 = \frac{\pi A_D}{A_p A_t} R^2, \quad (1.38)$$

де A_p – площа вхідної зіниці об’єктива.

З урахуванням співвідношення (1.38) рівняння (1.37) запишемо у вигляді

$$MRTD(v_x) = \frac{0,66 SNR(P_r) v_x}{M_s(v_x)} \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{A_D t_o f_f t_E}} \frac{\pi A_D R^2}{A_p A_t} \frac{1}{\tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda}. \quad (1.39)$$

Підставимо тепер (1.39) у вихідне рівняння (1.24) з урахуванням (1.32) і подамо його у вигляді

$$\begin{aligned} \frac{R_r^3 \exp(\kappa_A R_r)}{M_s(v_{xr})} &= \frac{0,965 \Delta T_0 V_t A_p A_t \tau_o}{SNR(P_r) \left[7,45 \sqrt{-\ln(1-P_r)} - 1 \right]} \times \\ &\times \sqrt{\frac{t_o f_f t_E}{A_D \alpha_D \beta_D}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda. \end{aligned} \quad (1.40)$$

Отримане рівняння (1.40) дозволяє розрахувати МДР об’єкта із заданою ймовірністю P_r . Права частина цього рівняння не залежить від дальності розпізнавання і є константою, що спрощує розв’язання цього рівняння.

1.8 Приклад розрахунку максимальної дальності розпізнавання

В якості прикладу застосування метода розрахунку максимальної дальності розпізнавання (МДР), що наведений в п. 1.6, розглянемо танковий тепловізор ALIS французької фірми SAGEM SA. Тепловізор має такі параметри: об’єктив – фокусна відстань $f'_o = 76$ мм, діаметр вхідної зіниці $D_p = 76$ мм, коефіцієнт пропускання $\tau_o = 0,65$; МСТ-ПВ

– робочий спектральний діапазон $\lambda_1 \dots \lambda_2 = 7,5 \dots 12,5$ мкм, питома виявлювальна здатність $D_{\max}^* = 5,5 \cdot 10^{10}$ см $\sqrt{\text{Гц}}/\text{Вт}$, розмір пікселя $V_D \times W_D = 22 \times 28$ мкм 2 ; шумова смуга пропускання попереднього підсилювача $\Delta f = 1,8$ МГц; частота кадрів $f_f = 25$ Гц.

Алгоритм застосування методу наступний:

1. Для розрахунку МДР скористаємося рівнянням (1.40), яке для ймовірності розпізнавання $P_r = 50\%$ запишемо у вигляді

$$\frac{R_r^3 \exp(\kappa_A R_r)}{M_s \left(\frac{3R_r}{V_t} \right)} = \frac{0,965 \Delta T_0 V_t A_p A_t \tau_o}{\text{SNR}(P_r) \cdot 6} \sqrt{\frac{t_o f_f t_E}{A_D \alpha_D \beta_D}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda. \quad (1.41)$$

2. З умови прикладу відомі параметри: $f_o = 76$ мм; $D_p = 76$ мм; $\tau_o = 0,65$; $f_f = 25$ Гц; $D_{\max}^* = 5,5 \cdot 10^{10}$ см $\sqrt{\text{Гц}}/\text{Вт}$; $A_D = V_D \times W_D = 6,16 \cdot 10^{-6}$ см 2 ; $t_E = 0,2$ с.

3. Зі стандарту НАТО 4347 відомі параметри: $\kappa_A = 0,2$ км $^{-1}$ (для сприятливих умов пропускання атмосфери); $\Delta T_0 = 2$ К; $V_t = 230$ см; $A_t = 5,29 \cdot 10^4$ см 2 ; $T_b = 288$ К.

4. Кутові розміри чутливої площадки ПВ знаходимо за формулою:

$$\alpha_D = \frac{V_D}{f_o'} = \frac{22 \cdot 10^{-3}}{76} = 0,289 \text{ мрад};$$

$$\beta_D = \frac{W_D}{f_o'} = \frac{28 \cdot 10^{-3}}{76} = 0,368 \text{ мрад}.$$

5. Модуляційну передавальну функцію ТПСС знайдемо виходячи з умови, що ця функція визначається розмірами чутливої площадки ПВ. Тоді відповідно до формули (3.168) із [4] МПФ приймача випромінювання уздовж напрямку сканування, а значить і МПФ ТПСС,

дорівнює

$$M_{TS}(\psi_x) \cong M_D(\psi_x) = \frac{\sin(\pi \alpha_D \psi_x)}{\pi \alpha_D \psi_x} = \frac{\sin(\pi \alpha_D \cdot 3R_r / V_t)}{\pi \alpha_D \cdot 3R_r / V_t} = \frac{\sin(1,18R_r)}{1,18R_r}.$$

6. Площа вхідної зіниці об'єктива дорівнює

$$A_p = \frac{\pi D_p^2}{4} = 45,36 \text{ см}^2.$$

7. Відношення сигнал/шум для упевненого виявлення одного штриха міри Фуко будемо вважати рівним $SNR_r = 4,5$, що було обґрунтовано в прикладі 3.8.1 [4]. При цьому слід пам'ятати, що реальна ймовірність розпізнавання P'_r залежить від ймовірності розпізнавання P_r , що визначається числом штрихів еквівалентної міри Фуко уздовж критичного розміру об'єкта, та ймовірністю виявлення штриха міри P_{dr} , що залежить від відношення сигнал/шум $SNR(P_r)$, тобто $P'_r = P_r P_{dr}$.

8. Час розкладу одного елемента t_o обчислюємо за формулою

$$t_o = \frac{1}{2\Delta f} = 2,78 \cdot 10^{-7} \text{ с}.$$

9. Обчислимо інтеграл у рівнянні (1.41). Оскільки ТПСС ALIS використовує фотонний МСТ-ПВ, то згідно з (4.188) із [4] цей інтеграл дорівнює

$$I = \frac{c_2 D_m^*}{\lambda_2 T_b^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_\lambda(\lambda, T_b) d\lambda = \frac{14388 \cdot 5,5 \cdot 10^{10}}{12,5 \cdot 288^2} \int_{7,5}^{12,5} M_\lambda(\lambda, T_b = 288 \text{ K}) d\lambda = 9,24 \cdot 10^6 \frac{\sqrt{\Gamma_{\text{ц}}}}{\text{К} \cdot \text{см}}.$$

10. Підставимо усі вихідні параметри в рівняння (1.41)

$$\frac{R_r^3 \exp(0,2R_r)}{\sin(1,18R_r)} = \frac{0,965 \cdot 2 \cdot 230 \cdot 45,36 \cdot 5,29 \cdot 10^4 \cdot 0,65}{4,5 \cdot 6} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{2,78 \cdot 10^{-7} \cdot 25 \cdot 0,2}{6,16 \cdot 10^{-6} \cdot 0,289 \cdot 10^{-3} \cdot 0,368 \cdot 10^{-3}}} \cdot 9,24 \cdot 10^6 = 3,45 \cdot 10^{17} = 345 \text{ км}^3.$$

Рішення цього трансцендентного рівняння методом послідовних наближень дає такий результат: $R_r = 2,45 \text{ км}$.

1.9 Просторова роздільна здатність

Для ОЕСС використовують різні види розділення: просторове, енергетичне, спектральне, часове. Для більшості ОЕСС важливо забезпечити необхідне просторове й енергетичне розділення.

Просторова частота $\nu_{x,\max}$, за якої МПФ ОЕСС зменшується до певного рівня, наприклад до значення порогового контрасту, що сприймається оператором, часто служить мірою просторового розділення. За таку просторову частоту можна також прийняти частоту Найквіста ν_N , яка дорівнює половині частоти просторової вибірки, що здійснюється в ОЕСС з матричного приймача випромінювання (МПВ). Інколи просторове розділення оцінюють за коефіцієнтом передачі модуляції (КПМ) $T_s(\nu_x)$, який визначає реакцію системи на періодичний тест-об'єкт прямокутної міри. Для переходу від МПФ $M_s(\nu_x)$ до КПМ $T_s(\nu_x)$ достатньо розкласти прямокутну функцію в ряд Фур'є [4].

У телебаченні досить давно використовують критерій О. Шаде, згідно з яким кутовий розмір елемент розділення визначають як

$$\delta\omega_s = \frac{1}{2\Delta\nu_{eff}} = \frac{1}{GNBW} = \left[2 \int_0^\infty M_s^2(\nu_x) d\nu_x \right]^{-1}, \quad (1.41)$$

де $\Delta\nu_{eff}$ – ефективна (еквівалентна) смуга пропускання

просторових частот; GNBW (Geometrical Noise Bandwidth) – геометрична шумова смуга пропускання ОЕСС.

Під час моделювання ОЕСС використовують різні моделі, в яких враховують як просторову, так і енергетичну роздільну здатність системи. У більшості країн під час дослідження процесів розпізнавання об'єктів за допомогою ОЕСС використовують такі моделі [15]:

- 1) Модель для обмежених контрастом систем, яка враховує пропускання атмосфери без спотворень зображення;
- 2) Модель для обмежених контрасто систем, яка враховує спотворення зображення атмосферою;
- 3) Стандартна модель для систем, обмежених шумами, яка враховує пропускання атмосфери без спотворень зображення;
- 4) Модель для систем, обмежених шумами, яка враховує спотворення зображення атмосферою.

В основному ОЕСС мають дві порогові чутливості: порогову чутливість зорової системи оператора і порогову чутливість ПВ.

1.10 Забезпечення температурного та просторового розділення

Температурна та просторова роздільні здатності мають взаємно-зворотний характер. На рис. 1.6 показані ці характеристики для однієї германієвої лінзи. Як величина просторової роздільної здатності на лівій ординаті використаний кут $\delta\omega_s$, що розділяється на об'єкті, який зумовлений абераційним зображенням осьової точки якщо $\beta' = 0$. На правій ординаті використана еквівалентна шуму різниця температур $NETD$, що визначається рівнянням (1.34), коли лінза фокусує зображення на одноелементний ПВ із КРТ з площею пікселя $V_D \times W_D = 0,15 \times 0,15 \text{ мм}^2$, який працює у спектральному діапазоні (8 – 12) мкм за еквівалентної шумової смуги пропускання підсилювача 1

МГц.

Із рис. 1.6 видно, що характерні параметри ТПСС $NETD < 1$ К та $\delta\omega_s < 1$ мрад не забезпечуються однією германієвою лінзою. Тому такий взаємно-зворотний характер просторового та температурного розділень вимагає шукати компромісні рішення під час вибору параметрів ТПСС.

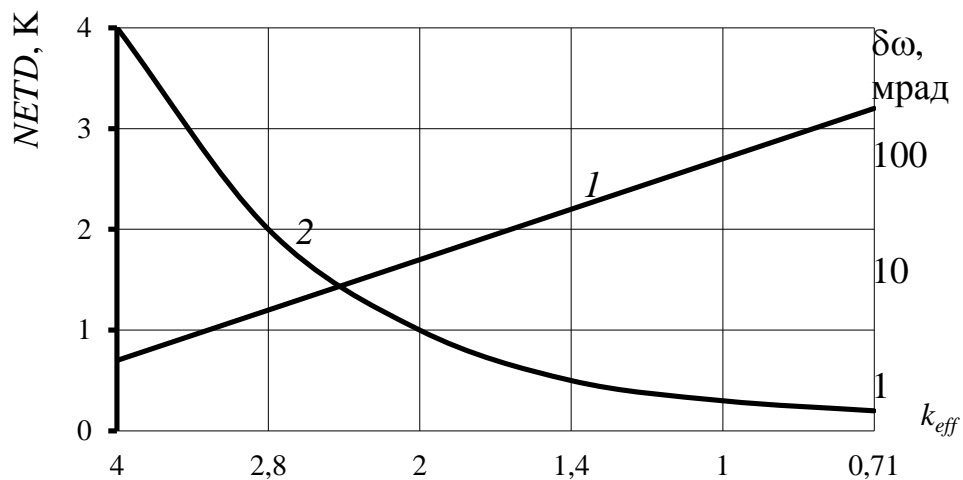


Рис. 1.6 - Просторове $\delta\omega$ і температурне $NETD$ розділення ТПСС, що має об'єкти з однієї лінзи «кращого» вигляду із германію: 1 – вплив кружка розсіювання лінзи; 2 – еквівалентна шуму різниця температур $NETD$ (300 К)

Виходячи з умови використання ТПСС та доцільності, обирається ПВ, а інфрачервоний об'єктив може бути заданий такими параметрами: робочий спектральний діапазон, фокусна відстань, діаметр вхідної зіниці та мінімальне кутове розділення. В основу синтезу інфрачервоного об'єктива покладено рівняння (1.34) для визначення еквівалентної шуму різниці температур

$$NETD = \frac{4k_{eff}^2}{\tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda} \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}}. \quad (1.42)$$

Перший етап проектування – це вибір оптимального робочого спектрального діапазону на основі критерію максимального температурного розділення:

$$MD = \max \left\{ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \varepsilon_t(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_t)}{\partial T} D^*(\lambda) d\lambda \right\}, \frac{\sqrt{\Gamma_{\Pi}}}{K \cdot \text{см}}. \quad (1.43)$$

При цьому спектральна світність фону не враховується. Як правило, параметр MD розраховують для випадку, коли пропускання атмосфери $\tau_A(\lambda) \rightarrow 1$, а ціль випромінює як АЧТ $\varepsilon_t = 1$.

Другий етап полягає в перевірці можливостей реалізації потрібного об'єктива. Усі параметри об'єктива у формулі (1.42), що впливають на температурну роздільну здатність, об'єднані у коефіцієнті

$$OS = \frac{\tau_o}{k_{eff}^2}. \quad (1.44)$$

З рівнянь (1.42) та (1.44) випливає вимога, яку ставлять до об'єктива

$$OS > \frac{4}{NETD \cdot MD} \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}}. \quad (1.45)$$

У табл. 1.1 наведено значення коефіцієнта OS для різних об'єктивів, які використовуються в ТПСС [4].

Таблиця 1.1 - Розроблені інфрачервоні об'єктиви k_{eff} / f_o з просторовим розділенням M_{o1}/v'_{x1} у точці на осі і параметром OS

Виробник	k_{eff}/f_o' , мм	M_{o1}/v'_{x1} , мм ⁻¹	OS
Research Optical Systems	0,62/75	0,65/10	2,08
Pilkington	0,64/100	0,20/25	1,95
Research Optical Systems	0,68/100	0,75/10	1,73
	0,70/33	0,73/10	1,63
	0,73/51	0,70/10	1,50
Dallmeyer	0,80/50	0,90/5	1,10
	0,95/130 ^{*)}	0,65/7,5	1,00
«Qvant», Kiev	0,85/120	0,5/24	0,97
	1,0/60	0,5/34	0,65
AGEMA	1,2/65	0,5/13	0,42
Zeiss Jena	1,2/86	0,5/12	0,38

Чим менше ефективне діафрагмове число k_{eff} , тим більше буде коштувати об'єктив. Якщо значення OS не задовольняє умову (1.45), тоді потрібне температурне розділення може бути досягнуте при використанні іншого ПВ з більш високою питомою виявлювальною здатністю, для якої значення MD повинно розраховуватись по-новому.

Третім етапом буде вибір фокусної відстані об'єктива. Із геометричних міркувань знаходимо, що для заданого кутового розділення $\delta\omega_s$ має виконуватись умова

$$f_o' \geq \frac{\max\{V_D, W_D\}}{\delta\omega_s}. \quad (1.46)$$

Як четвертий етап пропонується аналіз технологічних можливостей виготовлення даного об'єктива. Із формули (1.44) знаходимо, що потрібний діаметр об'єктива оцінюють за формулою

$$D_p \geq f_o' \sqrt{\frac{OS}{\tau_o}}. \quad (1.47)$$

Середній коефіцієнт пропускання об'єктива τ_o може бути

визначений, виходячи з оптичної схеми об'єктива (лінзовий, дзеркально-лінзовий або дзеркальний). Якщо D_p набуває значень, які технологічно не виконуються, необхідне температурне розділення може бути досягнуте за рахунок вибору іншого ПВ з більш високою виявлювальною здатністю.

На *п'ятому етапі* уточнюються дані з просторового розділення. Для випадку, коли МПФ об'єктива і ПВ мають однаковий контраст, рівний 0,5, на одній і тій самій просторовій частоті, кутове розділення ТПСС визначають за формулою [4]:

$$\delta\omega_{0,5} = \frac{1,66 \max\{V_D, W_D\}}{f'_o (1 - \beta')}. \quad (1.48)$$

Кутове розділення $\delta\omega_{0,5}$ відповідає об'єктиву з контрастом 0,5. Фокусна відстань і діаметр вхідної зіниці об'єктива мають обиратися більшими, ніж граничні, що необхідно для забезпечення температурного розділення у разі зображення позаосьових точок поля зору.

1.11 Поле зору

Поле зору ТПСС визначається розміром ПВ, параметрами об'єктива, системою розгортки та насадкою [4]. Якщо ТПСС використовує об'єктив з фокусною відстанню f'_o і МПВ, то поле зору системи розраховують за формулами

$$2\omega_{sx} = 2\arctg \frac{l_{Dx}}{2f'_o}; \quad 2\omega_{sy} = 2\arctg \frac{l_{Dy}}{2f'_o}, \quad (1.49)$$

де $l_{Dx} \times l_{Dy}$ – розмір МПВ.

У деяких ТПСС використовують насадку у вигляді телескопа Кеплера, кутове збільшення якого визначається фокусними відстанями

компонентів: $\Gamma_{ts} = f'_1 / f'_2$. При цьому ефективне значення фокусної відстані об'єктива збільшується у Γ_{ts} разів, а поле зору зменшується у Γ_{ts} разів.

1.12 Синтез тепловізійної системи за критерієм максимальної дальності спостереження

Під синтезом ТПСС будемо розуміти визначення (розрахунок) основних оптико-електронних характеристик інфрачервоного об'єктива і приймача випромінювання тепловізійної системи, яка забезпечує задані максимальні дальності виявлення, розпізнавання та ідентифікації. Синтез ТПСС базується на рівнянні (1.16), яке було отримане в розділі 1:

$$\Delta T_0 \exp(\kappa_A R) = 0,66 \cdot SNR(P_r) \cdot NETD \frac{v_x}{M_s(v_x)} \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{\Delta f \cdot t_o f_f t_E}}, \quad (1.50)$$

в якому числове значення просторової визначається за формулами (1.20) – (1.22) в залежності від заданих максимальної дальності виявлення R_d , розпізнавання R_r та ідентифікації R_i .

Згідно стандарту НАТО 4347 для кожної дальності слід указувати умови пропускання атмосфери (добрі чи обмежені), поле зору системи (у градусах або мілірадіанах), а також спосіб отримання МРРТ (вимір або розрахунок). Залежно від типу системи може застосовуватись одна або дві з наведених вище видів дальності.

Номінальні значення статичної дальності для ТПСС визначаються на основі усередненої МРРТ і за таких умов:

- розмір об'єкта – $V_t \times W_t = 2,3 \times 2,3 \text{ м}^2$;
- температурний контраст між об'єктом і заднім фоном (відносно температури АЧТ в 288 К) – $\Delta T_o = 2 \text{ К}$;

- коефіцієнт пропускання атмосфери в межах робочого спектрального діапазону визначається законом Бугера (1.9), де R – дальність, км; $\kappa_A = 0,2 \text{ км}^{-1}$ – показник ослаблення для сприятливих умов пропускання атмосфери; $\kappa_A = 1,0 \text{ км}^{-1}$ – показник ослаблення для обмежених умов пропускання атмосфери;
- критерії розділення для ймовірності 50 %:
 - - виявлення – 1 пара ліній/об’єкт;
 - - розпізнавання – 3 пари ліній/об’єкт;
 - - ідентифікація – 6 пар ліній/об’єкт.

Еквівалентна шуму різниця температур $NETD$ визначається за формулою (1.34), після підстановки якої до (1.50) отримаємо загальне рівняння для синтезу ТПСС

$$\Delta T_0 \exp(\kappa_A R) = 0,66 \cdot SNR(P_r) \frac{v_x}{M_s(v_x)} \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{A_D t_o f_f t_E}} \frac{4k_{eff}^2}{\tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda}. \quad (1.51)$$

Просторова частота в (1.51) визначається за формулою

$$v_{xN} = \frac{NR_N}{V_t}, \quad (1.52)$$

де $R_1 = R_d$ – максимальна дальність виявлення цілі, коли $N = 1$;
 $R_3 = R_r$ – максимальна дальність розпізнавання цілі, коли $N = 3$;
 $R_6 = R_i$ – максимальна дальність ідентифікації цілі, коли $N = 6$.

Для дослідження рівняння (1.51) представимо його у вигляді, коли ліва його частина містить параметри об’єктива і приймача випромінювання, які необхідно оптимізувати, а права частина містить постійні (задані) параметри.

$$\frac{\tau_o}{k_{eff}^2} \sqrt{\frac{A_D}{\alpha_D \beta_D}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda = \frac{2,64 SNR(P_r)}{\Delta T_0 \exp(\kappa_A R)} \frac{NR_N}{V_t M_s(NR_N / V_t)} \sqrt{\frac{1}{t_o f_f t_E}}. \quad (1.53)$$

Таким чином, отримані рівняння (1.51) і (1.53) дозволяють синтезувати параметри об'єктива і приймача випромінювання ТПСС, яка забезпечує задані максимальні дальності виявлення, розпізнавання та ідентифікації.

Як приклад застосування розробленого методу синтезу параметрів об'єктива і приймача випромінювання розглянемо тепловізійну камеру Catherine-FC, параметри якої представлені в підрозділі 1.6. Аналізуючи ці параметри можна зробити висновок, що камера Catherine-FC для розгортки зображення використовує паралельно-послідовний метод сканування матричним приймачем SOFRADIR IRCCD 288x4 (ID TL061-XX). Сканування відбувається горизонтально за два проходи, в результаті якого формується 288x2=576 рядків.

Синтез будемо проводити на основі рівняння (1.53), яке, наприклад, для заданої максимальної дальності розпізнавання має вигляд:

$$\frac{\tau_o}{k_{eff}^2} \sqrt{\frac{A_D}{\alpha_D \beta_D}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D * (\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda = \frac{2,64 SNR(P_r)}{\Delta T_0 \exp(\kappa_A R_r)} \frac{3 R_r}{V_t M_s (3 R_r / V_t)} \sqrt{\frac{1}{t_o f_f t_E}}. \quad (1.54)$$

В результаті синтезу повинні бути визначені основні параметри об'єктива: задня фокусна відстань f_o' , діафрагмове число k_{eff} (діаметр вхідної зіниці D_p) та кутове поле зору $2\omega_o$.

Основними характеристиками тепловізора Catherine-FC, які необхідні для розрахунку максимальної дальності розпізнавання є:

- 1) Робочий спектральний діапазон (7,5 – 10,5) мкм (або (7,7 – 10,3) мкм);
- 2) Кутове поле зору: широке поле зору (ШПЗ) $2\omega_x \times 2\omega_y = 9^\circ \times 6,7^\circ$;
вузьке поле зору (ВПЗ) $2\omega_x \times 2\omega_y = 3^\circ \times 2,2^\circ$;
- 3) Максимальна дальність спостереження за стандартом НАТО 4347

при ВПЗ: виявлення $R_d = 8,3$ км; розпізнавання $R_r = 3,3$ км; ідентифікації $R_i = 1,8$ км;

- 4) Еквівалентна шуму різниця температур $NETD = 180$ мК;
- 5) Модуляційна передавальна функція в центрі поля зору дорівнює: для ШПЗ – 27%; для ВПЗ – 80%;
- 6) Формат кадру $p \times q = 754 \times 576$;
- 7) Частота кадрів $f_f = 100$ Гц;
- 8) Приймач випромінювання – лінійка SOFRADIR IRCCD 288x4 (ID TL061-XX): розмір пікселя $v_D \times w_D = 25 \times 28$ мкм; відстань між пікселями уздовж сканування $V_D = 43$ мкм.

Алгоритм синтезу наступний:

1. Відомими в рівнянні (1.54) є:
 $A_D = v_D w_D = 25 \cdot 28 \text{ мкм}^2 = 7 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-2}$ – площа чутливої площадки пікселя; $SNR(P_r) = 4,5$ – відношення сигнал/шум для упевненого виявлення одного штриха міри Фуко на екрані дисплея [4]; $\Delta T_0 = 2 \text{ К}$ – температурний контраст між ціллю і фоном; $\kappa_A = 0,2 \text{ км}^{-1}$ – показник ослаблення для сприятливих умов пропускання атмосфери; $V_t = 230 \text{ см}$ – розмір тест-об'єкта; $f_f = 100 \text{ Гц}$ – частота кадрів; $t_E = 0,2 \text{ с}$ – постійна часу зорової системи.

2. Розраховуємо інтеграл в (1.54)

$$I = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda, \quad (1.55)$$

де $\lambda_1 - \lambda_2 = 7,5 - 10,5$ мкм – робочий спектральний діапазон;
 $D^*(\lambda)$ - питома виявлювальна здатність приймача випромінювання;
 $M_\lambda(\lambda, T)$ - функція Планка

$$M_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]}, \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{мкм}}, \quad (1.56)$$

де $c_1 = 37415 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мкм}^4$, $c_2 = 14388 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ – постійні коефіцієнти; λ – довжина хвилі, мкм.

Диференціальну спектральну енергетичну світність АЧТ, яка входить до інтеграла (1.55), визначають за формулою [4]

$$\frac{\partial M_{\lambda}(\lambda, T)}{\partial T} \approx \frac{c_2}{\lambda T^2} M_{\lambda}(\lambda, T). \quad (1.57)$$

Приймач випромінювання SOFRADIR IRCCD 288x4 (ID TL061-XX) являється фотонним приймачем, для якого питома виявлювальна здатність апроксимується функцією [4]

$$D^*(\lambda) = \begin{cases} \frac{\lambda}{\lambda_2} D_{\max}^*, & \text{якщо } \lambda \leq \lambda_2; \\ 0, & \text{якщо } \lambda > \lambda_2, \end{cases} \quad (1.58)$$

де λ_2 – гранична довжина хвилі; $D_{\max}^* = D^*(\lambda_2) = 5,5 \cdot 10^{10} \text{ см} \sqrt{\text{Гц}} / \text{Вт}$.

Підставимо (1.57) і (1.58) в інтеграл (1.55)

$$I = \frac{c_2 D_{\max}^*}{T^2 \lambda_2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda}(\lambda, T) d\lambda. \quad (1.59)$$

Після підстановки вихідних даних до (1.59) і обчислення інтеграла за програмою, яка наведена в додатку 2, маємо

$$I = \frac{14388 \cdot 5,5 \cdot 10^{10}}{288^2 \cdot 10,5} \int_{7,5}^{10,5} M_{\lambda}(\lambda, T = 288 \text{ K}) d\lambda = 6,58 \cdot 10^6 \frac{\sqrt{\text{Гц}}}{\text{К} \cdot \text{см}}.$$

3. Визначимо час формування одного елемента зображення за формулою [4]

$$t_o = \frac{1}{2\Delta f}, \quad (1.60)$$

де Δf – ефективна шумова смуга пропускання електронної системи обробки відеосигналу.

Смугу пропускання Δf для послідовно-паралельного метода сканування визначаємо за формулою [4]

$$\Delta f = \frac{2\omega_x 2\omega_y f_f}{2q_D \alpha_D \beta_D \eta_{sc}}. \quad (1.61)$$

Представимо цю формулу у вигляді

$$\Delta f = \frac{pqf_f}{2q_D \eta_{sc}}, \quad (1.62)$$

де $\eta_{sc} = 0,8$ – ефективність сканування оптико-механічної розгортки тепловізора; $p \times q = 754 \cdot 576 = 434304$ – число елементів розкладу в зображенні; $q_D = 288$ – число пікселів приймача у вертикальному напрямку. Після підстановки вихідних параметрів до формули (1.62) маємо: $\Delta f = 94250$ Гц. Тоді час формування одного елемента (1.70) $t_o = 5,3 \cdot 10^{-6}$ с.

Для перевірки достовірності розрахованого параметра t_o скористаємося формулою (1.42) для визначення еквівалентної шуму різниці температур $NETD$. Після підстановки отриманих вище параметрів маємо:

$$NETD = \frac{4k_{eff}^2}{\tau_o 6,58 \cdot 10^6} \sqrt{\frac{94250}{7 \cdot 10^{-6}}} = 0,07 \frac{k_{eff}^2}{\tau_o} = 0,18.$$

Звідси маємо, що об'єktiv тепловізора Catherine-FC має діафрагмове число $k_{eff} = \sqrt{2,57\tau_o}$. Якщо коефіцієнт пропускання об'єктива $\tau_o = 0,9$, то $k_{eff} = 1,52$. Такий результат підтверджує

достовірність параметра t_o .

4. Визначаємо модуляційну передавальну функцію тепловізора за формулою [4]

$$M_s(\nu_x) = \exp\left(-2\pi^2 r_s^2 \nu_x^2\right), \quad (1.63)$$

де $r_s = 0,28\delta\omega_s$ – радіус зображення точкового джерела випромінювання на екрані дисплея, мрад; $\delta\omega_s$ – кутове розділення тепловізора.

Якщо кутове розділення тепловізора $\delta\omega_s$ визначається шляхом узгодження МПФ об'єктива і приймача випромінювання на рівні 0,5, то згідно (1.48) маємо

$$\delta\omega_s = \frac{1,66V_D}{f_o'}. \quad (1.64)$$

Тоді МПФ тепловізора (1.63) матиме вигляд

$$M_s(\nu_x) = \exp\left[-2\pi^2 \left(0,28 \frac{1,66V_D}{f_o'}\right)^2 \nu_x^2\right], \quad (1.65)$$

де розмір пікселя V_D вимірюється в мікрометрах, а фокусна відстань об'єктива f_o' в міліметрах.

Для критерію синтезу «максимальна дальність розпізнавання» функція (1.65) матиме вигляд

$$M_s(\nu_x) = \exp\left[-2\pi^2 \left(0,28 \frac{1,66V_D}{f_o'}\right)^2 \left(\frac{3R_r}{V_t}\right)^2\right], \quad (1.66)$$

де розмір тест-об'єкта V_t вимірюється в метрах, а дальність розпізнавання R_r – в кілометрах. Для $V_D = 43$ мкм і $V_t = 2,3$ м функція

(1.66) має вигляд

$$M_s(\nu_x) = \exp \left[-1,34 \cdot 10^4 \left(\frac{R_r}{f_o'} \right)^2 \right].$$

5. Визначаємо кутові розміри чутливої площадки ПВ як

$$\alpha_D = \frac{V_D}{f_o'} = \frac{22}{f_o'}, \text{ мрад}; \quad \beta_D = \frac{W_D}{f_o'} = \frac{28}{f_o'}, \text{ мрад}.$$

6. Підставляємо наведені вище вихідні дані до формули (1.54)

$$\exp \left[1,34 \cdot 10^4 \left(\frac{R_r}{f_o'} \right)^2 \right] \frac{\tau_o f_o'}{k_{eff}^2} 10^{-4} \cdot 6,58 \cdot 10^6 = \frac{2,64 \cdot 4,5}{2 \exp(0,2 R_r)} \frac{3 R_r}{2,3} \sqrt{\frac{1}{5,3 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 0,2}}.$$

Представимо останнє рівняння у вигляді

$$\exp \left[1,34 \cdot 10^4 \left(\frac{R_r}{f_o'} \right)^2 \right] \frac{\tau_o f_o'}{k_{eff}^2} 658 = 750 \frac{R_r}{\exp(0,2 R_r)}. \quad (1.67)$$

Отримане рівняння дозволяє синтезувати об'єкти тепловізора за критерієм «задана максимальна дальність розпізнавання».

Для перевірки достовірності рівняння (1.67) розглянемо тепловізор Catherine-FC, який для вузького поля зору має максимальну дальність розпізнавання $R_r = 3,3$ км. Крім того, в п. 3 алгоритму синтезу об'єктива, було встановлено, що $k_{eff} = \sqrt{2,57 \tau_o}$. Підставимо ці значення до рівняння (1.67)

$$\exp \left[-1,34 \cdot 10^4 \left(\frac{3,3}{f_o'} \right)^2 \right] 0,389 \cdot 658 f_o' = 750 \frac{3,3}{\exp(0,2 \cdot 3,3)}.$$

Після обчислень маємо трансцендентне рівняння

$$\exp \left(-\frac{1,46 \cdot 10^5}{f_o'^2} \right) f_o' = 4,92. \quad (1.68)$$

Розв'язком цього рівняння методом послідовних наближень є

$$f'_o = 198 \text{ мм.}$$

Отримає значення задньої фокусної відстані f'_o із паспортних параметрів тепловізора Catherine-FC для вузького поля зору $2\omega_x \times 2\omega_y = 3^\circ \times 2,2^\circ$. Із рис. 1.7 маємо

$$\operatorname{tg} \omega_y = \frac{Y_D}{2f'_o}, \quad (1.69)$$

де $Y_D = 8 \text{ мм}$ – розмір матричного приймача уздовж осі у [4]. Із формули (1.69) маємо

$$f'_o = \frac{Y_D}{2\operatorname{tg} \omega_y} = \frac{8}{2\operatorname{tg} 1,1^\circ} = 208 \text{ мм.} \quad (1.70)$$

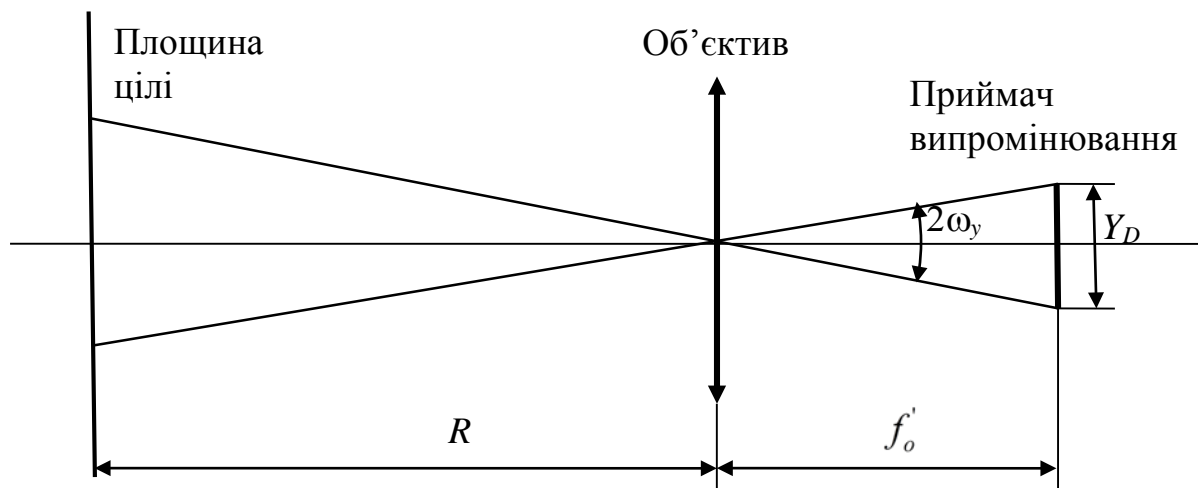


Рис. 1.7 - Схема для розрахунку фокусної відстані об'єктива

Деяка відмінність числових значень фокусних відстаней об'єктива, отриманих за формулами (1.68) і (1.70), пояснюється завищеними значення спектрального діапазону роботи тепловізора та обраним відношення сигнал/шум $SNR(P_r) = 4,5$.

7. Діаметр входної зіниці об'єктива D_p визначимо наступним чином. В п. 3 було отримано співвідношення для розрахунку діафрагмового числа об'єктива тепловізора Catherine-FC:

$f_o' / D_p = k_{eff} = \sqrt{2,57\tau_o}$. Звідси знаходимо діаметр вхідної зіниці об'єктива

$$D_p = \frac{f_o'}{\sqrt{2,57\tau_o}}. \quad (1.71)$$

Наприклад, коефіцієнт пропускання об'єктива $\tau_o = 0,9$, то $D_p = 130$ мм.

8. Поле зору об'єктива визначається за формулою

$$2\omega_o = \sqrt{(2\omega_x)^2 + (2\omega_y)^2} = 2\sqrt{\left(\arctg \frac{X_D}{2f_o'}\right)^2 + \left(\arctg \frac{Y_D}{2f_o'}\right)^2}, \quad (1.72)$$

де $X_D \times Y_D$ – розмір матричного приймача випромінювання. Для приймача випромінювання SOFRADIR IRCCD 288x4 (ID TL061-XX) $X_D \times Y_D = 8 \times 0,38$ мм². Тоді кутове поле зору об'єктива згідно (1.72) дорівнює

$$2\omega_o = 2\sqrt{\left(\arctg \frac{0,38}{2 \cdot 198}\right)^2 + \left(\arctg \frac{8}{2 \cdot 198}\right)^2} = 2,3^\circ.$$

**Програма розрахунку максимальної дальності виявлення,
розпізнавання та ідентифікації в Mathcad**

МДР – максимальна дальність розпізнавання.

Дано:

Розглядаємо тепловізор з такими параметрами:

$f_o := 76 \cdot \text{мм}$ – фокусна відстань об'єктива;

$D_p := 76 \cdot \text{мм}$ – діаметр вхідної зіниці;

$\tau_o := 0.65$ – коефіцієнт пропускання;

Робочий спектральний діапазон:

$\lambda_{\min} := 7.5 \cdot \text{мкм}$ – мінімальна довжина хвилі спектрального діапазону;

$\lambda_{\max} := 12.5 \cdot \text{мкм}$ – максимальна довжина хвилі спектрального діапазону;

$D_{\max}^* := 5.5 \cdot 10^{10} \cdot \frac{\text{см} \cdot \sqrt{\text{Гц}}}{\text{Вт}}$ – питома виявлювальна здатність;

Розміри пікселя:

$V_D := 22 \cdot \text{мкм}$ – по осі ОХ;

$W_D := 28 \cdot \text{мкм}$ – по осі ОУ;

$\Delta f := 1.8 \cdot \text{МГц}$ – шумова смуга пропускання попереднього підсилювача;

$f_f := 25 \cdot \text{Гц}$ – частота кадрів;

Додаткові дані:

$P_r := 50\%$ – імовірність розпізнавання;

$t_E := 0.2 \cdot \text{с}$ – час інтегрування ока (постійна часу ока);

Параметри умов пропускання атмосфери:

$\kappa_A := 0.2 \cdot \text{км}^{-1}$ – коефіцієнт ослаблення атмосфери;

$\Delta T_o := 2 \cdot \text{К}$ – різниця температур (температурний контраст);

$V_t := 230 \cdot \text{см}$ – розмір об'єкта по осі ОХ;

$A_t := 5.29 \cdot 10^4 \cdot \text{см}^2$ – площа об'єкта;

$T_b := 288 \cdot \text{К}$ – температура фону;

$\text{SNR}_r := 4.5$ – відношення сигнал/шум;

Постійні коефіцієнти для формули Планка:

$C_1 := 37415 \cdot \frac{\text{Вт} \cdot \text{мкм}^4}{\text{см}^2}$

$C_2 := 14388 \cdot \text{мкм} \cdot \text{К}$

Розв'язання:

1. Розрахунок площі пікселя:

$A_D := V_D \cdot W_D = 6.6 \times 10^{-6} \cdot \text{см}^2$

2. Кутові розміри чутливої площадки ПВ:

$\alpha_D := \frac{V_D}{f_o} = 0.289 \cdot \text{мрад}$

$$\beta_D := \frac{W_D}{f_o} = 0.368 \cdot \text{мрад}$$

3. Модуляційна передавальна функція ТПСС:

$$M_{TS}(R_r) := \frac{\sin\left(\pi \cdot \alpha_D \cdot \frac{3 \cdot R_r}{V_t}\right)}{\pi \cdot \alpha_D \cdot \frac{3 \cdot R_r}{V_t}}$$

4. Площа вхідної зіниці об'єктива:

$$A_p := \frac{\pi \cdot D_p}{4} \cdot \text{см}^2 = 45.36 \cdot \text{см}^2$$

5. Час розкладу одного елемента:

$$t_o := \frac{1}{2 \cdot \Delta f} = 2.78 \times 10^{-7} \cdot \text{с}$$

6. Обчислення інтегралу:

$$M_\lambda := \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot \left(\exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T_b}\right) - 1\right)} d\lambda = 12.092 \cdot \frac{\text{МВт}}{\text{см}^2}$$

$$I := \frac{C_1 \cdot D_{\max}^*}{\lambda_{\max} \cdot T_b^2} \cdot M_\lambda = 9.229 \times 10^6 \cdot \frac{\sqrt{\Gamma_{\text{ц}}}}{\text{К} \cdot \text{см}}$$

7. Результат (обраховане значення) правої частини рівняння РПЧР (1.33):

$$\text{РПЧР} := \frac{0.965 \cdot \Delta T_o \cdot V_t \cdot A_p \cdot A_t \cdot \tau_o}{\text{SNR}_r \cdot 6} \cdot \sqrt{\frac{t_o \cdot f_f \cdot t_E}{A_D \cdot \alpha_D \cdot \beta_D}} \cdot I = 344.14 \cdot \text{км}^3$$

8. Функція для розв'язку трансцендентного рівняння:

$$\text{fun}(R_r) := \frac{R_r^3 \cdot \exp(\kappa_A \cdot R_r)}{M_{TS}(R_r)} - \text{РПЧР}$$

Визначення кореня рівняння:

Початкова точка відліку:

$$x_0 := \begin{array}{|l} i \leftarrow 0 \\ k \leftarrow \text{fun}(0 \cdot \text{м}) \\ \text{while } (k \leq 0 \cdot \text{км}^3) \\ \quad \begin{array}{|l} i \leftarrow i + 1 \\ k \leftarrow \text{fun}(i \cdot \text{м}) \end{array} \\ i \cdot \text{м} \end{array}$$

$$x_0 = 2.47 \cdot \text{км}$$

$$R_r := \text{root}(\text{fun}(x) \cdot \text{км}^{-3}, x, 0, x_0) = 2.47 \cdot \text{км}$$

9. Результат розв'язання рівняння:

$$R_r = 2.47 \cdot \text{км}$$

Програма розрахунку інтеграла (3.19) в Mathcad

$$T := 288 \quad C1 := 3.74 \cdot 10^4 \quad C2 := 1.438 \cdot 10^4$$

$$M(\lambda) := \frac{C1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{C2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)}$$

$$I := \int_{7.5}^{10.5} M(\lambda) \, d\lambda = 7.238 \times 10^{-3}$$

$$\frac{14388 \cdot 5.5 \cdot 10^{10}}{288^2 \cdot 10.5} \cdot I = 6.577 \times 10^6$$

Перелік посилань до розділу 1

1. Тарасов М. М., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М.: Логос, 2004. – 444 с.
2. Карасик В. Е., Орлов В. М. Лазерные системы видения: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 352 с.
3. Ллойд Дж. Системы тепловидения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 416 с.
4. Колобродов В.Г., Лихоліт М.І. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження: Підручник – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 364 с.
5. Колобродов В. Г., Лихолит Н. И. К определению максимальной дальности обнаружения и распознавания тепловизионной системы БТТ // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2002. – Вып. 5. – С. 35–39.
6. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: Учеб. пособие для вузов. – Л.: Машиностроение, 1977. – 600 с.
7. Вафиади А. В. Аналитические модели сканирующих тепловизионных приборов // Оптический журнал. – 1997. – № 1. – С. 5–8.
8. Lei Lin, Benkang Chang. New apparent distance-detecting equation for low-light level imaging system // Optical Engineering. – 2004, February – № 43(2). – P. 415–419.
9. Колобродов В. Г., Шустер Н. Тепловізійні системи (фізичні основи, методи проектування і контролю, застосування): Підруч. для вузів. – К.: Тираж, 1999. – 340 с.
10. STANAG 4347 Definition of nominal static ranger performance for thermal imaging systems, 1995.

11. Хадсон Р. Инфракрасные системы / Пер. с англ. Я. Б. Герчикова, Ю. Е. Голубчика, С. Г. Кина. – М.: МИР, 1972. – 535 с.
12. G. Mie Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen // Leipzig, Ann. Phys. 330. - 1908, p.377 - 445.
13. The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook / Acceta, J.S. and Shumaker, D.L. (eds) – SPIE, Optical Engineering Press, Bellingham, 1993. - 3024 p.
14. Глущенко А.Р., Гордиенко В.И., Бурак А.В., Денисенко А.Ю. Танковые ночные системы и приборы наблюдения / Черкассы, 2007. - 442с.
15. Melamed R., Yitzhaky Y., Kopeika N. S., Rotman S. R. Experimental comparison of three target acquisition models // Optical Engineering. – 1998 – Vol. 37. – № 7. – P. 1902–1913.

2 ОПТИМІЗАЦІЯ ТА УЗГОДЖЕННЯ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ З ПРИЙМАЧАМИ ВИПРОМІНЮВАННЯ

В деяких випадках доцільно не проектувати систему «з нуля», а використати доступні конструктивні вузли та блоки, попередньо узгодивши їх між собою.

2.1 Просторова роздільна здатність тепловізора

Сучасні тепловізори в якості приймача випромінювання використовують мікроболометричні матриці, які працюють без систем охолодження [1, 2, 3]. Важливою характеристикою тепловізорів є просторова роздільна здатність, яка визначається МПФ об'єктива і матричного приймача випромінювання (МПВ). Проблемі узгодження аберацій об'єктива і геометричних параметрів МПВ присвячено значну кількість робіт [4, 5]. Але в цих роботах не розглядається питання про вибір просторової частоти або значення МПФ, за яких узгоджуються аберації об'єктива і період структури пікселів МПВ.

В даному підрозділі розглядається взаємозв'язок між радіусом кружка розсіювання об'єктива і періодом матриці пікселів МПВ при узгодженні модуляційних передавальних функцій об'єктива і приймача випромінювання.

Передавальну функцію можна застосовувати тільки для лінійних інваріантних систем. Тепловізори, які спостерігають об'єкти з невеликим температурним контрастом в межах обмеженого поля зору, можна вважати лінійними інваріантними системами. Модуляційна передавальна функція таких систем визначається добутком МПФ її окремих елементів: об'єктива, МПВ, електронного блока та дисплея. В

більшості практичних випадків електронний блок і дисплей не спотворюють зображення, яке створює тепловізор [4]. Тому вважають, що МПФ електронного блоку і дисплея дорівнюють одиниці в межах робочого просторового спектрального діапазону.

Для спрощення обчислень будемо використовувати одновимірний випадок уздовж осі x , яка співпадає з напрямом сканування. За таких умов МПФ тепловізора визначається як

$$M_S(\nu_x) = M_O(\nu_x) M_{Ds}(\nu_x), \quad (2.1)$$

де $M_S(\nu_x)$ – МПФ системи «об’єктив – МПВ»; $M_O(\nu_x)$ – МПФ об’єктива; $M_{Ds}(\nu_x)$ – просторова МПФ матричного приймача випромінювання; ν_x – просторова частота, мм^{-1} .

Сучасні інфрачервоні об’єктиви мають аберації, які обмежені дифракцією випромінювання на апертурі об’єктива. МПФ таких об’єктивів зручно апроксимувати функцією [5]

$$M_O(\nu_x) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left(\arccos x - x \sqrt{1-x^2} \right), & \text{якщо } 0 \leq x \leq 1; \\ 0, & \text{якщо } x > 1, \end{cases} \quad (2.2)$$

де $x = 1.22 \lambda k_{eff} \nu_x = r_E \nu_x$; k_{eff} – діафрагмове число об’єктива; r_E – радіус кружка Ейрі.

Для практичного застосування МПФ (2.2) її апроксимують функцією

$$M_{O,ap}(\nu_x) = \begin{cases} 1 - \frac{x}{\eta_{di}}, & \text{якщо } 0 \leq x \leq \eta_{di}; \\ 0, & \text{якщо } x > \eta_{di}, \end{cases} \quad (2.3)$$

де параметр η_{di} визначає відносне відхилення МПФ об’єктива з абераціями від дифракційно обмеженої МПФ. Наприклад, 80% дифракційного обмеження якості зображення відповідає значенню параметра $\eta_{di} = 0,8$. Для дифракційно обмеженого об’єктива $\eta_{di} = 1,0$.

Просторова МПФ мікроболометричної матриці визначається періодами матриці $V_D \times W_D$ і має для одновимірного випадку вигляд

$$M_{Ds}(v_x) = \frac{\sin(\pi V_D v_x)}{\pi V_D v_x}. \quad (2.4)$$

Таким чином, МПФ тепловізора залежить від радіуса кружка розсіювання r_o об'єктива (або радіуса кружка Ейрі r_E) і періоду V_D матриці приймача випромінювання. Для досягнення високого просторового розділення тепловізора необхідно узгодити між собою параметри r_o і V_D .

2.2 Критерії узгодження МПФ об'єктива і МПВ

Для МПФ об'єктива і приймача випромінювання пропонується два критерії узгодження параметрів r_o і V_D :

1. *Перший критерій* – рівність МПФ об'єктива і приймача випромінювання на частоті Найквіста $v_N = \frac{1}{2V_D}$, тобто коли виконується умова:

$$M_o(v_N) = M_{Ds}(v_N) = M_1. \quad (2.5)$$

2. *Другий критерій* – рівність значень МПФ об'єктива і МПВ на просторовій частоті v_{x2} , тобто коли виконується умова:

$$M_o(v_{x2}) = M_{Ds}(v_{x2}) = M_2. \quad (2.6)$$

Розглянемо декілька варіантів формування зображення системою «об'єктив – МПВ»:

1) МПВ звичайної якості і об'єктив високої якості (малий абераційний кружок). В даному випадку на скільки б якісним не був об'єктив, якість зображення буде обмежена МПВ;

2) Об'єктив звичайної якості і МПВ високої якості

(малий період матриці). В даному випадку, аналогічно попередньому, на скільки б якісну матрицю ми не взяли, якість зображення буде обмежена абераціями об'єктива;

3) МПВ і об'єктив однакової якості. В даному випадку для отримання якісного зображення необхідно узгодити параметри об'єктива r_o і приймача випромінювання V_D .

2.3 Узгодження параметрів об'єктива і МПВ

Для узгодження параметрів системи за першим критерієм, спочатку встановимо залежність радіуса кружка розсіювання об'єктива від періоду матриці. Підставимо (2.3) і (2.4) до (2.5)

$$1 - \frac{1.22\lambda k_{eff}}{2V_D\eta_{di}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi V_D}{2V_D}\right)}{\frac{\pi V_D}{2V_D}} = M_1 = \frac{2}{\pi}$$

Звідси отримаємо залежність радіуса кружка Ейрі r_E від періоду матриці V_D при узгодженні МПФ об'єктива і МПВ на частоті Найквіста

$$r_E = 1.22\lambda k_{eff} = \left(1 - \frac{2}{\pi}\right) 2V_D\eta_{di} = 0.726 \cdot V_D\eta_{di} \quad (2.7)$$

За таких умов узгодження результуюча МПФ системи на частоті Найквіста матиме значення $M_{1s} = \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 = 0.406$, тобто контраст зображення зменшується до 40%.

На рис. 2.1 наведені МПФ об'єктива, МПВ і тепловізора при узгодженні на частоті Найквіста, які визначаються формулами (2.3), (2.4) і (2.1), коли $k_{eff} = 1$, $\lambda = 10$ мкм, $V_D = 25$ мкм. За таких умов відносне відхилення МПФ об'єктива з абераціями від дифракційно обмеженої МПФ складає $\eta_{di} = 0.672$, що свідчить про можливість

використання простого об'єктива з відносно великими абераціями.

Для узгодження параметрів системи за другим критерієм підставимо (2.3) і (2.4) до (2.5)

$$1 - \frac{r_E v_{x2}}{\eta_{di}} = \frac{\sin(\pi V_D v_{x2})}{\pi V_D v_{x2}} = M_2. \quad (2.8)$$

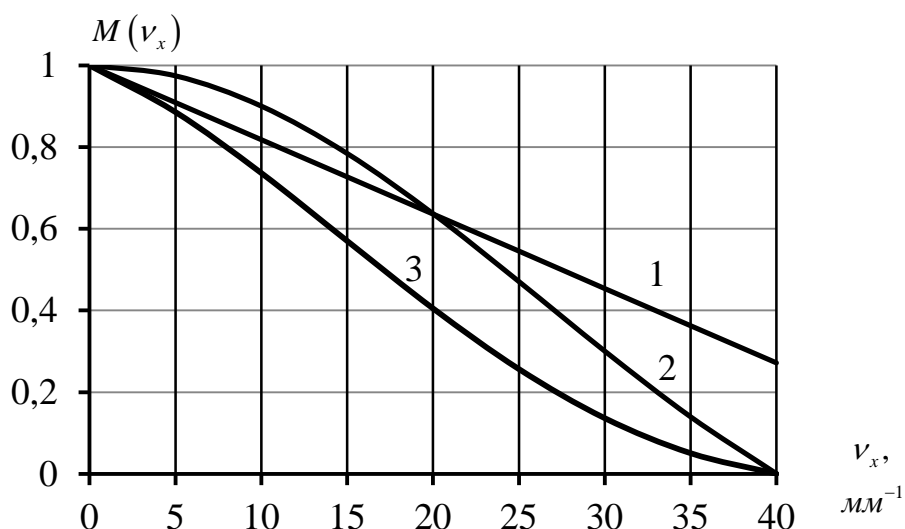


Рис. 2.1 - Узгодження параметрів об'єктива r_o і МПВ V_D за першим критерієм: 1 – МПФ об'єктива $M_O(v_x)$ для $\eta_{di} = 0,672$; 2 – просторова МПФ МПВ $M_{Ds}(v_x)$; 3 – МПФ тепловізора $M_S(v_x)$

Розв'яжемо систему рівнянь (2.8) для встановлення залежності радіуса кружка Ейрі об'єктива r_E від періоду матриці V_D при заданому контрасті M_2 . Знайдемо спочатку із другого рівняння залежність просторової частоти узгодження v_{x2} від значення МПФ M_2 :

$$\frac{\sin(\pi V_D v_{x2})}{\pi V_D v_{x2}} = \text{sinc}(V_D v_{x2}) = M_2.$$

Звідки

$$v_{x2} = \frac{1}{V_D} \text{sinc}^{-1}(M_2), \quad (2.9)$$

де $\text{sinc}^{-1}(z)$ – функція, що обернена до функції $\text{sinc}(z)$.

Підставимо частоту (2.9) до першого рівняння (2.8):

$$1 - \frac{r_E}{\eta_{di} V_D} \text{sinc}^{-1}(M_2) = M_2.$$

Звідки

$$r_E = \frac{1 - M_2}{\text{sinc}^{-1}(M_2)} \eta_{di} V_D. \quad (2.10)$$

Для перевірки достовірності отриманого рівняння (2.10) розглянемо застосування цього рівняння при узгодженні за першим критерієм, коли $M_2 = \frac{2}{\pi}$:

$$r_E = \frac{1 - \frac{2}{\pi}}{\text{sinc}^{-1}\left(\frac{2}{\pi}\right)} \eta_{di} V_D = 0.726 \cdot \eta_{di} V_D,$$

що співпадає з формулою (2.7). На рис. 2.2 наведені МПФ об'єктива, МПВ і тепловізора при узгодженні за другим критерієм (2.5), які визначаються формулами (2.3), (2.4) і (2.1), коли $k_{eff} = 1$, $\lambda = 10$ мкм, $V_D = 25$ мкм, $\eta_{di} = 1,0$.

Аналіз отриманих результатів свідчить про таке:

- 1) При узгодженні за першим критерієм контраст зображення зменшується до 0,406;
- 2) Для дифракційно обмеженого об'єктива результуюча МПФ системи на частоті Найквіста дорівнює 0,482, що свідчить про підвищення контрасту зображення на 7,6 % відносно зображення, отриманого при узгодженні за першим критерієм. За цих умов узгодження відбувається на частоті $\nu_{x2} = 13 \text{ мм}^{-1}$ при контрасті $M_2 = 0,88$.

Пропонується ефективність узгодження аберацій об'єктива і

періоду матричної структури ПВ визначати добутком просторової частоти Найквіста ν_N і МПФ тепловізора на цій частоті $M_s(\nu_N)$, який назовемо *ефективною просторовою смугою пропускання тепловізора*

$$\Delta \nu_{ef} = \nu_N M_s(\nu_N). \quad (2.11)$$

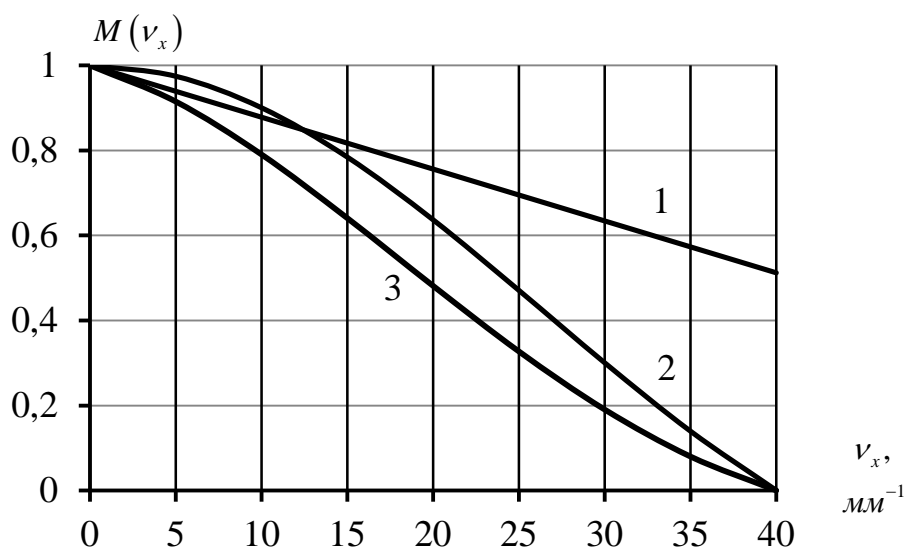


Рис. 2.2 - Узгодження параметрів об'єктива r_o і МПВ V_D за другим критерієм: 1 – МПФ дифракційно обмеженого об'єктива $M_o(v_x)$; 2 – просторова МПФ МПВ $M_{Ds}(v_x)$; 3 – МПФ тепловізора $M_s(v_x)$

Згідно цього критерію тепловізори, МПФ яких представлені на рис. 2.1 і 2.2, мають відповідні смуги пропускання $\Delta \nu_{ef1} = 20 \cdot 0.406 = 8.12 \text{ мм}^{-1}$ і $\Delta \nu_{ef2} = 20 \cdot 0.482 = 9.64 \text{ мм}^{-1}$. Це означає, що якість (інформативність) зображення при узгодженні за другим критерієм збільшилась на 18,8%.

За останній час проведені значні науково-технологічні роботи по створенню мікроболометричної матриці з періодом $V_D = 17 \text{ мкм}$. Тому виникла потреба у визначенні МПФ тепловізора $M_s(v_x)$, який використовує саме таку матрицю.

На рис. 2.3 наведені модуляційні передавальні функції об'єктива, МПВ і тепловізора, які визначаються формулами (2.3), (2.4) і (2.1), коли

$k_{eff} = 1$, $\lambda = 10$ мкм, $V_D = 17$ мкм, $\eta_{di} = 1,0$.

Із отриманих графіків випливає важливий висновок, що узгодження дифракційно обмеженого об'єктива для довжини хвилі $\lambda = 10$ мкм з матрицею, яка має періодом пікселів $V_D = 17$ мкм, відбувається на просторові частоті $\nu_{xr} = 28$ мм⁻¹, яка близька до частоти

Найквіста $\nu_N = \frac{1000}{2 \cdot 17} = 29$ мм⁻¹.

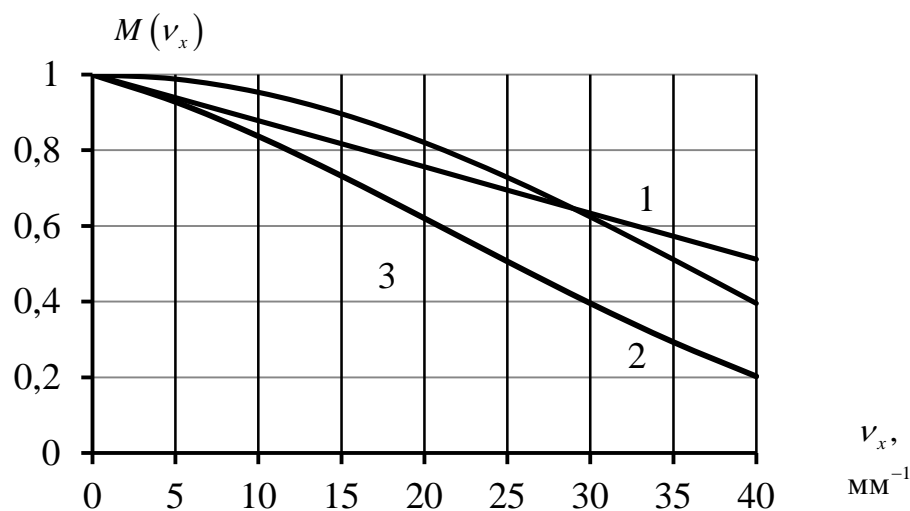


Рис. 2.3 - Узгодження параметрів об'єктива r_o і МПВ V_D за першим критерієм: 1 – МПФ дифракційно обмеженого об'єктива $M_O(\nu_x)$; 2 – просторова МПФ МПВ $M_{Ds}(\nu_x)$, коли $V_D = 17$ мкм; 3 – МПФ тепловізора $M_S(\nu_x)$

Повне узгодження відбувається для довжини хвилі $\lambda = 10,1$ мкм. При цьому ефективна смуга пропускання такого тепловізора становить $\Delta \nu_{ef} = 29 \cdot 0,406 = 11,8$ мм⁻¹. Це означає, що якість зображення тепловізора, який використовує мікроболометричну матрицю з періодом пікселів $V_D = 17$ мкм і дифракційно обмежений об'єктив, збільшилась на 22,1% порівняно з тепловізором, що має матрицю з періодом $V_D = 25$ мкм.

Таким чином, на основі представлених досліджень можна зробити такі висновки:

1) Розглянуто два критерії узгодження МПФ об'єктива і матричного приймача випромінювання, які дозволяють оцінити вплив радіуса кружка розсіювання об'єктива і періоду матриці приймача випромінювання на якість тепловізійного зображення;

2) Запропоновано для порівняння якості тепловізійного зображення використовувати ефективну просторову смугу пропускання тепловізора. За цим критерієм узгодження використання в тепловізорі дифракційно обмеженого об'єктива з кружком розсіювання r_E замість абераційного об'єктива з радіусом кружка розсіювання $1,49r_E$ дозволить підвищити якість зображення на 18,8% за умови, що приймач випромінювання має період матриці 25 мкм;

3) Встановлено, що використання в тепловізорі мікроболометричної матриці з період пікселів 17 мкм, дозволяє підвищити якість зображення на 22% порівняно з тепловізором, який має матрицю з періодом 25 мкм.

Перелік посилань до розділу 2

1. Тарасов М. М., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М.: Логос, 2004. – 444 с.
2. Хребтов И.А., Маляров В.Г. Неохлаждаемые тепловые матричные приемники ИК излучения // Оптический журнал. – 1997. – №6. С. 3–17.
3. Kaplan H. Practical applications of infrared and imaging equipment. – SPIE, Bellingham, Washington, USA, 1999. – 164p.
4. Ллойд Дж. Системы тепловидения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 416 с.
5. Колобродов В.Г., Лихоліт М.І. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження: Підручник – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 364 с.

3 ВИБІР МАТЕРІАЛІВ ОБ'ЄКТИВІВ ТЕПЛОВІЗІЙНИХ СИСТЕМ

Розглянемо оптичні і термооптичні характеристики інфрачервоних матеріалів, які найчастіше використовуються в конструкціях ТПСС.

3.1 Аналіз характеристик матеріалів ІЧ об'єктивів

Виходячи з номенклатури ІЧ оптичних матеріалів, що є в наявності у замовника (Ge, GaAs, ИКС25), оптимальним вибором матеріалу вхідного вікна оптичної системи тепловізора є германій. Матеріал характеризується найбільш високою міцністю серед більшості оптичних матеріалів, прозорих в ІЧ області спектру, не вступає у взаємодію з атмосферною вологою і має високу твердість.

Для проектування ІЧ об'єктиву, що фокусує зображення на ПВ, розглянемо трикомпонентну схему, що дозволяє отримати високу якість зображення, яке добре узгоджується з сучасними МПВ, навіть без використання асферичних поверхонь. Також при використанні ІЧ триплетів існує можливість застосування методу пасивної оптичної атермалізації для термостабілізації характеристик системи в необхідному, обумовленому вимогами, температурному діапазоні навколишнього середовища.

Характеристики ІЧ оптичних матеріалів, що рекомендуються для проектування тепловізійної системи спостереження, представлені в таблиці 3.1.

Певну складність в термостабілізацію ІЧ об'єктиву обумовлюють високі значення β_λ для арсеніду галію та термооптичної сталі V_t для германію.

Таблиця 3.1 - Оптичні і термооптичні характеристики ІЧ матеріалів

Оптичний матеріал	Температурний коефіцієнт зміни показника заломлення $\beta_\lambda \cdot 10^{-5}, \text{град}^{-1}$ *	ТКЛР*, $\alpha \cdot 10^{-6}, \text{град}^{-1}$ (-60°C - +20°C)	Коефіцієнт дисперсії Аббе ν^{***}	Термооптична стала $V_t \cdot 10^{-6}, \text{град}^{-1}$
Ge	5,2 - 4	6,1	611	124
GaAs	14,7	5,7	61,69	58,9
ИКС25	4,6	19,7	94,75	6,3
*Значення β_λ приведені для температурного діапазону 10°C - 30°C. ** Температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу. ***Значення ν приведені для спектрального діапазону 8-14 мкм.				

Для підвищення дальності виявлення об'єктів необхідним є нанесення просвітлюючих покриттів на оптичні компоненти тепловізійної системи, що забезпечить пропускання випромінювання на довжині хвилі $\lambda = 11$ мкм на рівні 93% (пропускання германієвої лінзи без просвітлюючого покриття 45-46%) для кожного оптичного компонента та коефіцієнт відбиття $\leq 1\%$. Графіки пропускання і відбиття германієвої лінзи з двостороннім просвітлюючим багат шаровим покриттям (29ИЭ×K₁). (16ИЭ×K₂). (29ИЭ×K₃). (37ИЭ×K₄) по ОСТ 3-1901-85, наведені на рис. 3.1 та 3.2 відповідно.

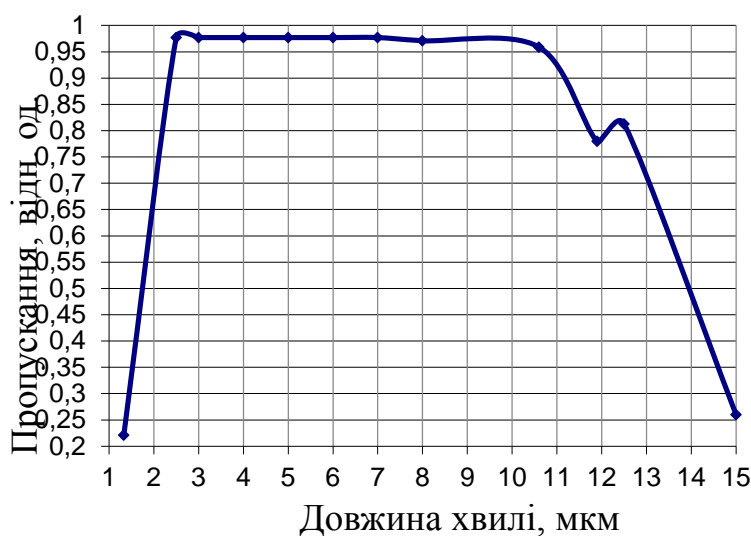


Рис. 3.1 - Пропускання матеріалу германієвої лінзи з просвітлюючим покриттям

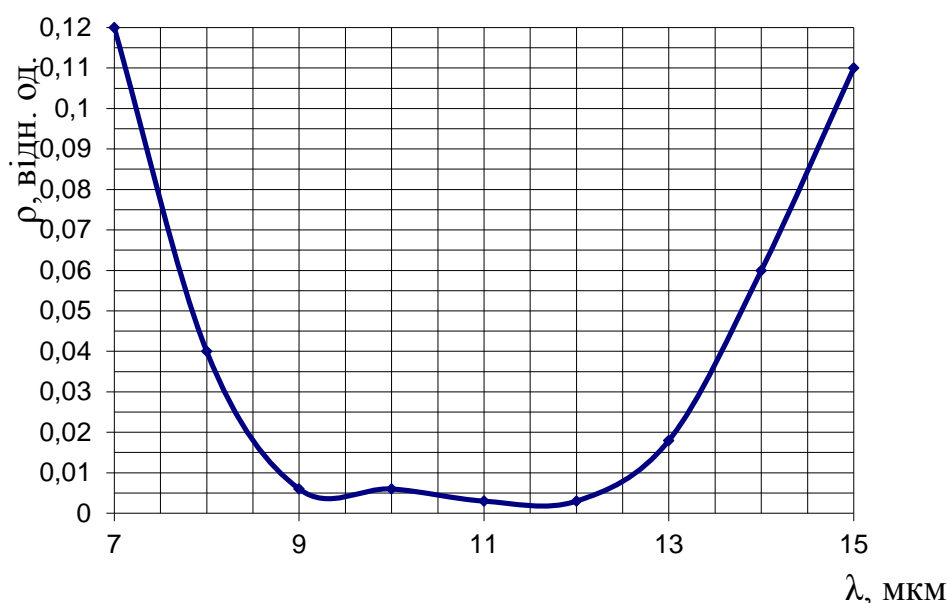


Рис. 3.2 – Спектральний коефіцієнт відбиття $\rho(\lambda)$ просвітлюючого покриття на германії

З метою зменшення власного інфрачервоного паразитного випромінювання компонентів оптичного тракту, а також зменшення відбиття від оправ оптичних компонентів, всі поверхні оправ об'єктиву необхідно виконувати матовими, наприклад, із застосуванням анодного оксидування. Коефіцієнт дифузного відбиття металевої поверхні, виконаної з алюмінію з анодним чорним оксидуванням, для спектрального діапазону $\Delta\lambda=8-14$ мкм дорівнює 4,5% при падінні випромінювання по нормалі і збільшується до 25% при куті падіння 80° . Для запобігання появи паразитного випромінювання в системі необхідно уникати віньєтування на оптичних компонентах.

3.2 Метод пасивної оптичної атермалізації лінзового трикомпонентного об'єктиву

Для стабілізації якості зображення ІЧ об'єктиву тепловізійної системи в необхідному температурному діапазоні з метою збереження

її характеристик, в тому числі і максимальної дальності виявлення об'єктів, необхідно вживання методів атермалізації.

Перевага оптичних методів пасивної атермалізації очевидна у разі, коли вклад механічних елементів конструкції в терморозфокусування може бути зведений до мінімуму за рахунок використання для механічних деталей оправ і корпусу матеріалів з малим значенням температурного коефіцієнта лінійного розширення (інварні сплави). Інакше необхідно враховувати температурну деформацію матеріалу несучої конструкції, і її вплив на терморозфокусування ІЧ об'єктиву.

Розроблений математичний апарат дозволяє проектувати атермалізовані ахроматичні ІЧ триплети з можливістю одночасної мінімізації аберацій зображення для випадку однорідного температурного розподілу в оптичній системі.

Метод синтезу атермалізованого ахроматичного ІЧ триплету [1] заснований на тому, що при виборі матеріалів трьох лінз необхідно обчислити оптичні сили Φ_{1-3} компонентів, розв'язуючи систему трьох рівнянь для виконання наступних умов:

– умова масштабу

$$h_1\Phi_1 + h_2\Phi_2 + h_3\Phi_3 = 1 \quad (3.1)$$

– умова виправлення хроматизму положення

$$h_1^2\Phi_1/\nu_1 + h_2^2\Phi_2/\nu_2 + h_3^2\Phi_3/\nu_3 = 0 \quad (3.2)$$

– умова атермалізації, тобто збереження величини заднього фокального відрізка $S'_{F'}$ у заданому температурному діапазоні за умови, що вкладом деформації корпусу в терморозфокусування можна знехтувати

$$S'_{F'} = S'_{F'_{termo}} \text{ або } h_3 = h_{3_{termo}} \quad (3.3)$$

де h_{1-3} – висоти першого допоміжного нульового променя (ДНП) на

оптичних компонентах системи; ν_{1-3} – коефіцієнти дисперсії оптичних матеріалів.

Для системи з оптичною силою Φ , що складається з трьох нескінченно тонких лінз, що знаходяться в повітрі, система рівнянь для отримання комбінацій атермалізований ахроматичних ІЧ триплетів включатиме рівняння (3.4 – 3.6).

$$\Phi_1 + (1 - \Phi_1 d_1) \Phi_2 + (1 - \Phi_1 d_1 - d_2 (\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d_1)) \Phi_3 = 1, \quad (3.4)$$

$$\Phi_1 / \nu_1 + (1 - \Phi_1 d_1)^2 \Phi_2 / \nu_2 + (1 - \Phi_1 d_1 - d_2 (\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d_1))^2 \Phi_3 / \nu_3 = 0. \quad (3.5)$$

Умова атермалізації, тобто збереження величини заднього фокального відрізка при зміні температури матиме вигляд

$$\begin{aligned} & 1 - \Phi_1 d_1 - d_2 (\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d_1) - (1 - \Phi_1 (1 - \Delta t V_{t1}) (d_1 + d_2) - \Phi_2 (1 - \Delta t V_{t2}) \times \\ & \times d_2 (1 - \Phi_1 (1 - \Delta t V_{t1}) d_1)) / (\Phi_1 (1 - \Delta t V_{t1}) + \Phi_2 (1 - \Delta t V_{t2}) + \Phi_3 (1 - \Delta t V_{t3}) - \\ & - \Phi_1 (1 - \Delta t V_{t1}) d_1 (\Phi_2 (1 - \Delta t V_{t2}) + \Phi_3 (1 - \Delta t V_{t3})) - \Phi_3 (1 - \Delta t V_{t3}) d_2 \times \\ & \times (\Phi_1 (1 - \Delta t V_{t1}) + \Phi_2 (1 - \Delta t V_{t2}) - \Phi_1 (1 - \Delta t V_{t1}) \Phi_2 (1 - \Delta t V_{t2}) d_1)) = 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

У систему рівнянь (3.4 – 3.6), на підставі якої виконується розрахунок оптичних сил по заданим відстаням між компонентами d_1 , d_2 для атермалізованого ахроматичного ІЧ триплету, замість другого рівняння виправлення хроматизму положення можна ввести умову виправлення хроматизму збільшення:

$$\begin{aligned} & y_1 \Phi_1 / \nu_1 + (y_1 - d_1 / (1 - \Phi_1 d_1)) (1 - \Phi_1 d_1)^2 \Phi_2 / \nu_2 + \\ & + (y_1 - d_1 / (1 - \Phi_1 d_1) - d_2 / (1 - \Phi_1 d_1) / (1 - \Phi_1 d_1 - d_2 (\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d_1))) \times \\ & \times (1 - \Phi_1 d_1 - d_2 (\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d_1))^2 \Phi_3 / \nu_3 = 0 \end{aligned} \quad (3.7)$$

де y_1 - висота другого ДНП на першому оптичному компоненті триплету.

Підбір найбільш вигідних з точки зору степені атермалізації

комбінацій матеріалів компонентів триплету здійснюється по діаграмі, наведений на рис. 3.3, де по осі абсцис відкладається значення коефіцієнта дисперсії Аббе, а по осі ординат - добуток термооптичної сталої матеріалу на цей коефіцієнт [2].

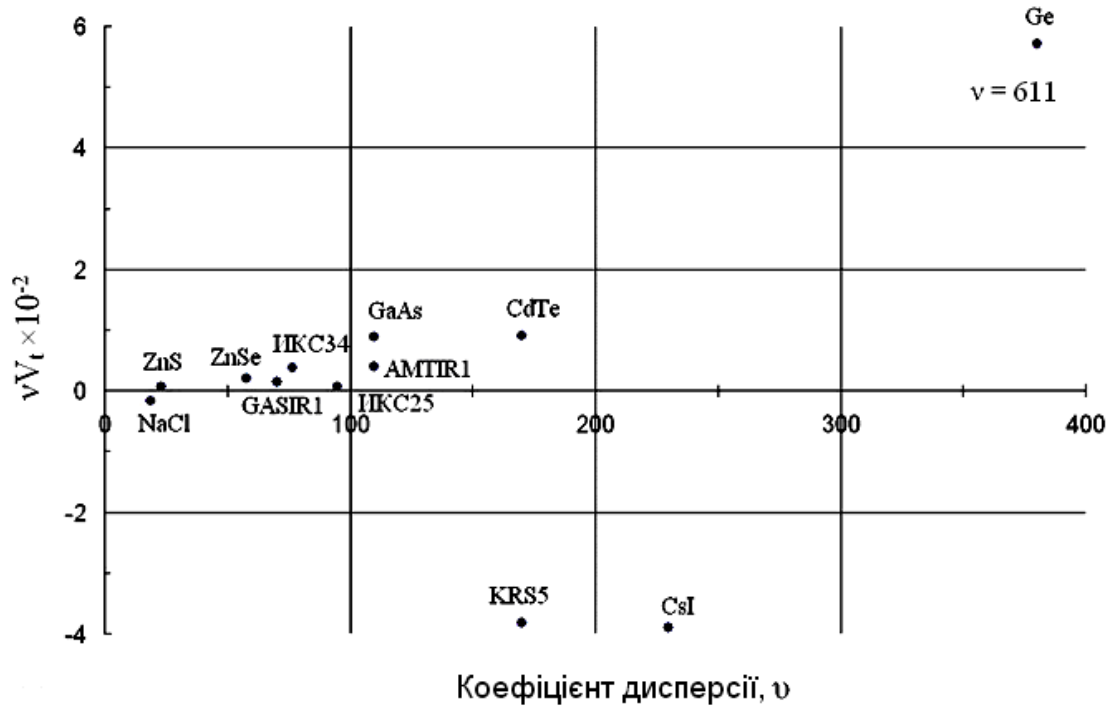


Рис. 3.3 - Діаграма v - vV_t матеріалів діапазону спектру (8 – 14) мкм

Використовуючи наведену діаграму, при виборі матеріалів компонентів атермалізованого ахроматичного триплету слід керуватися наступними основними критеріями.

Площа трикутника, утвореного трьома оптичними матеріалами, має бути якомога більше. Це обумовлено тим, що пасивна оптична атермалізація ІЧ-триплету базується на синтезі оптичної системи, конструктивні параметри і термооптичні характеристики матеріалів якої мають бути підібрані таким чином, щоб при зміні температури (за умови однорідного температурного розподілу в системі) баланс оптичних сил компонентів системи залишався незмінним. Чим більше різниця в термооптичних постійних оптичних матеріалів компонентів

ІЧ-триплету, тим більше комбінацій конструктивних параметрів атермалізованої системи можна буде отримати. При малій площі трикутника на діаграмі ν - νV_t термооптичні властивості матеріалів будуть близькі один до одного, в цьому випадку комбінації конструктивних параметрів системи, що задовольняють умові атермалізації, будуть відсутні або будуть нетехнологічними, наприклад, з надзвичайно великою товщиною оптичних компонентів, з малими радіусами кривизни оптичних поверхонь і т. д. Баланс коефіцієнтів дисперсії оптичних матеріалів базується на умові ахроматизації оптичної системи.

Три матеріали на діаграмі ν - νV_t не мають бути розташовані на одній прямій лінії, оскільки площа трикутника, сформованого ними, в цьому випадку дорівнюватиме нулю. Цей критерій обумовлений тим, що у переважній більшості випадків пасивну оптичну атермалізацію ІЧ-триплету неможливо реалізувати маючи в розпорядженні лише два оптичні матеріали. Існує можливість створення атермалізованих ІЧ-триплетів, два оптичні компоненти яких складаються з одного матеріалу. Прикладом такої комбінації є трикомпонентний об'єктив, перший і третій оптичні компоненти якого виконані з ИКС25, матеріалом другої лінзи є ZnSe. Проте кількість таких комбінацій надзвичайно обмежена, і вони є виключенням із запропонованого математичного методу пасивної атермалізації.

Виходячи з вищевикладеного, метод розрахунку атермалізованого ахроматичного ІЧ триплету містить наступні етапи.

1. По діаграмі ν - νV_t обрати комбінацію матеріалів компонентів триплету, керуючись раніше вказаними критеріями.
2. По заданим відстаням між компонентами (d_1 та d_2) з системи трьох рівнянь (3.4 -3.6) визначити значення оптичних сил Φ_1 , Φ_2 , та Φ_3 .

3. Розрахувати висоти першого ДНП на другому і третьому компонентах. Комбінації з $h_3 < 0,3$ використовувати не рекомендується, оскільки в цьому випадку відстань між поверхнею останнього компонента триплету та площиною приймача випромінювання буде недостатньою для його кріплення.

4. Проаналізувати отримані комбінації ІЧ триплетів і вибрати з них ті, які більшою мірою відповідають критеріям, що цікавлять (рівню аберацій, величині температурної зміни заднього фокального відрізка, відстаням між компонентами оптичної системи, можливостям розробника застосовувати ту або іншу комбінацію матеріалів).

5. Визначити радіуси кривизни оптичних поверхонь атермалізованого і ахроматичного ІЧ триплету із збереженням співвідношення оптичних сил компонентів з одночасною мінімізацією сферичної аберації ($S_I=0$) та коми ($S_{II}=0$).

З метою мінімізації аберацій вищих порядків на стадії проектування оптичної системи слід прагнути до виконання наступних умов:

1) Наведені величини оптичних сил компонентів Φ_i до оптичної сили всього об'єктиву повинні задовольняти умові $|\Phi_i| \leq 1$;

2) Загальна довжина об'єктиву L (відстань від першої поверхні до площини зображення) з умови виправлення астигматизму повинна задовольняти умові $L > f'$, для об'єктивів з малими і середніми полями зору $L \approx (1,5 - 2,5) f'$, для ширококутних об'єктивів $L \approx (3 - 5) f'$;

3) Кути падіння променів на поверхні мають бути мінімальними – цій умові задовольняють меніскові лінзи, особливо апланатичні меніски;

4) Суми Зейделя S_I та S_{II} на оптичних поверхнях системи мають бути мінімальними по абсолютній величині і не

перевищувати значень 0,2 – 0,5.

Конструктивні параметри отриманого атермалізованого ахроматичного триплету перераховуються для набуття необхідного значення фокусної відстані шляхом масштабування системи. Подальша оптимізація трикомпонентного об'єктиву проводиться з метою визначення оптимальної товщини оптичних компонентів і може бути виконана з використанням будь-який САПР оптичних систем, наприклад, в Zemax.

3.3 Вибір композиції конструктивних параметрів оптичної схеми об'єктива тепловізійної системи спостереження

Другий етап проектування атермалізованого триплету на основі наведеного методу пасивною оптичною атермалізації дозволяє визначити всі можливі варіації співвідношень оптичних сил компонентів конкретної комбінації оптичних матеріалів для системи з тонких лінз. Можливі варіанти комбінацій матеріалів ІЧ об'єктиву GaAs, Ge та ИКС25 містить таблиця 3.2.

Таблиця 3.2 - Комбінації оптичних сил атермалізованого ІЧ триплету

Матеріали компонентів			Оптичні сили компонентів			Суми Зейделя		Терморозфокусування в діапазоні зміни температур $\pm 40^{\circ}\text{C}^*$, мкм
1 ^{го}	2 ^{го}	3 ^{го}	Φ_1	Φ_2	Φ_3	S_I	S_{II}	
ИКС25	Ge	GaAs	1,696682	0,45388	-1,15056	-3,57124	-0,34905	0,1
ИКС25	GaAs	Ge	1,696682	-1,15056	0,45388	-2,52645	-0,31991	0,1
Ge	ИКС25	GaAs	0,45388	1,696682	-1,15056	-4,92625	-0,26283	0,1
Ge	GaAs	ИКС25	0,45388	-1,15056	1,696682	2,44801	-0,37245	0,1
GaAs	Ge	ИКС25	-1,15056	0,45388	1,696682	3,295041	-0,34331	0,1
GaAs	ИКС25	Ge	-1,15056	1,696682	0,45388	5,046834	-0,42953	0,1

*Для номінальної температури системи 20°C

Можливі комбінації характеристик ІЧ триплету для композиції ИКС25, GaAs та Ge (другий рядок таблиці 3.2) з урахуванням відстаней між оптичними компонентами представлені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Комбінації характеристик атермалізованого ІЧ триплету

Відстані між оптичними компонентами		Висоти на 2 ^{му} та 3 ^{му} оптичних компонентах		Суми Зейделя			Термороз-фокусування в діапазоні зміни температур $\pm 40^{\circ}\text{C}$, мкм	Оптичні сили компонентів		
d_1	d_2	h_2	h_3	S_I	S_{II}	S_{III}		Φ_1	Φ_2	Φ_3
0,125	0,250	0,723	0,689	-5,049	0,236	1,519	0,01	2,216	-2,875	1,253
0,042	0,583	0,937	0,694	-1,621	-0,459	0,368	0,01	1,509	-1,165	0,840
0,083	0,542	0,864	0,674	-2,033	-0,389	0,523	0,01	1,631	-1,481	0,963
0,125	0,542	0,761	0,648	-3,219	-0,238	0,842	0,01	1,911	-2,238	1,221
0,083	0,292	0,852	0,746	-2,701	-0,214	0,906	0,01	1,776	-1,659	0,854
0,125	0,417	0,746	0,669	-3,893	-0,060	1,073	0,01	2,033	-2,478	1,219
0,042	0,625	0,938	0,680	-1,549	-0,480	0,326	0,1	1,489	-1,148	0,864
0,083	0,667	0,870	0,640	-1,762	-0,476	0,394	0,1	1,564	-1,402	1,024
0,042	0,542	0,936	0,708	-1,695	-0,439	0,414	0,1	1,528	-1,182	0,817
0,042	0,500	0,936	0,723	-1,773	-0,418	0,462	0,1	1,548	-1,199	0,795

Після розрахунку радіусів кривизни оптичних поверхонь атермалізованого ахроматичного ІЧ триплету, перший, другий та третій оптичні компоненти якого складаються з ИКС25, GaAs та Ge відповідно, отримуємо дані, наведені в таблиці 3.4.

Всі поверхні оптичних компонентів є сферичними, а фокусна відстань атермалізованих триплетів дорівнює одиниці.

Подальші масштабування і оптимізація конструктивних параметрів тепловізійної системи спостереження проводилися за допомогою САПР Zemax.

Таблиця 3.4 - Конструктивні параметри і характеристики триплету

Радіуси кривизни оптичних поверхонь						Відстані між оптичними компонентами		Суми Зейделя		Терморозфокусування в діапазоні зміни температур $\pm 40^{\circ}\text{C}$, мкм
r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	d_1	d_2	S_I	S_{II}	
0,612	3,833	-3,651	0,822	0,652	0,922	0,125	0,042	-1,99E-07	-3,15E-08	0,01
0,905	25,714	-7,619	1,519	0,723	0,893	0,083	0,125	-3,64E-08	3,39E-10	0,01
0,688	5,066	-4,206	0,974	0,667	0,924	0,125	0,250	-1,34E-06	-1,52E-07	0,1
1,042	1056,5	-20,05	1,872	0,758	0,908	0,042	0,208	-1,27E-06	3,42E-08	0,1
0,655	4,604	-3,800	0,910	0,659	0,919	0,125	0,167	-9,49E-07	-1,53E-07	0,1
0,673	4,907	-3,926	0,944	0,660	0,915	0,125	0,208	-4,42E-07	-9,19E-08	0,1
1,090	19,410	104,32	1,888	0,635	0,768	0,042	0,542	-2,22E-07	-4,54E-07	0,1
1,085	22,539	559,56	1,888	0,648	0,782	0,042	0,500	-2,13E-07	-4,25E-07	0,1
0,639	4,315	-3,714	0,877	0,658	0,921	0,125	0,125	-9,17E-08	-2,06E-08	0,1
0,954	14,316	-14,50	1,578	0,671	0,838	0,083	0,375	3,94E-07	2,95E-07	0,1

3.4 Проектування оптичної системи тепловізора та аналіз її характеристик

На основі отриманих комбінацій конструктивних параметрів ІЧ трикомпонентного об'єктиву (див. таблицю 3.4), синтезованого відповідно до розробленого методу пасивної оптичною атермалізації, з урахуванням характеристик існуючих аналогів [3 - 5] було виконано проектування оптичної системи тепловізора. Конструктивні параметри системи наведені в таблиці 3.5.

Оптична система має наступні характеристики:

- фокусна відстань $f' = 116,3$ мм;
- діаметр вхідної зіниці 100 мм;
- відносний отвір 1 : 0,86;
- кут поля зору $2\omega = 5^{\circ}$;
- кутове збільшення 4,7*;

- задній фокальний відрізок $S'_{F'} = 57,6$ мм;
- спектральний діапазон роботи (8 - 12) мкм;
- всі оптичні компоненти виконані без вживання асферичних поверхонь.

Таблиця 3.5 - Конструктивні параметри оптичної схеми ТПСС

№	Радіус кривизни, мм	Товщина по осі, мм	Матеріал компонента	Світловий діаметр, мм
1	∞	5	Ge	100
2	∞	200	—	100
3	∞	0	Дзеркало*	159,32
4	—	300**	—	—
5	148,564	20	ИКС25	145,43
6	1551,044	8,5	—	143,67
7	-1744,576	11,087	GaAs	129,87
8	236,071	107,333	—	121,27
9	97,783	12,381	Ge	99,72
10	140,031	57,618	—	93,54

* Плоске дзеркало, що виконує злам оптичної осі системи на кут 90°

** Відстань по оптичній осі від дзеркала до об'єктиву-триплета

Тривимірне зображення оптичної системи тепловізора (переріз 3/4) з проходженням променів на різних кутах поля зору представлено на рис. 3.4.

Габарити системи та її збільшення можуть варіюватися шляхом зміни відстаней по оптичній осі від вхідного вікна до дзеркала та від дзеркала до об'єктиву-триплета.

Діаграми кружків розсіювання в фокальній площині системи на оптичній осі і для кутів поля зору $\omega = 1,25^\circ; 2^\circ; 2,5^\circ$ представлені на рис. 3.5.

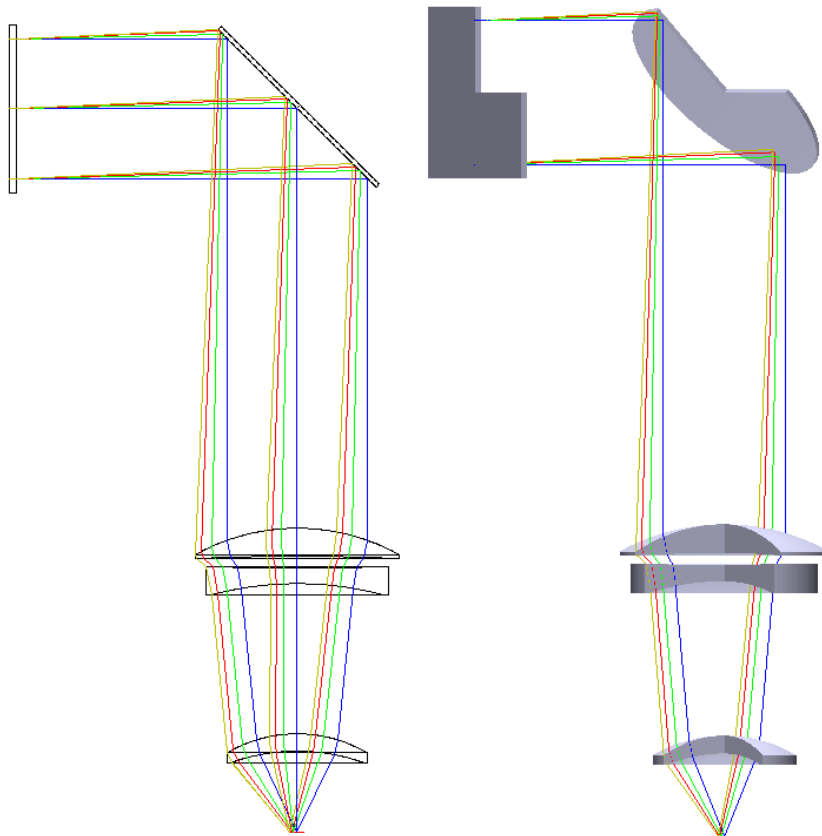


Рис. 3.4 - Оптична система тепловізора

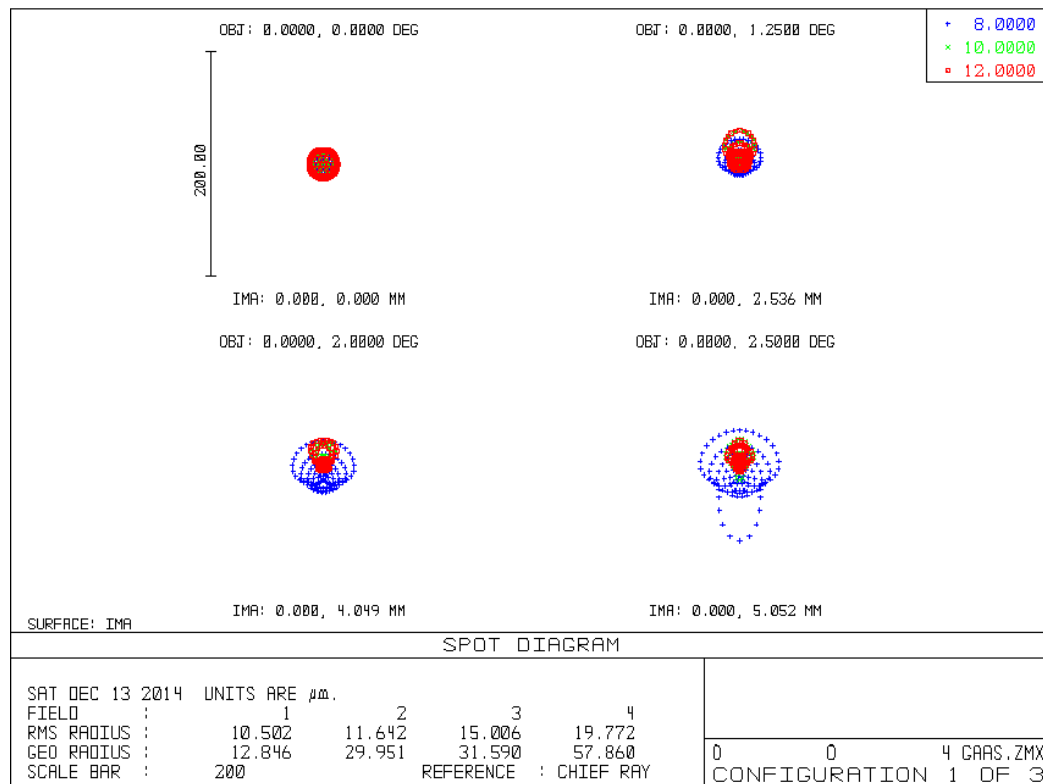


Рис. 3.5 - Діаграма кружків розсіювання в фокальній площині системи при температурі 20°C

Розмір кружків розсіювання в фокальній площині системи узгоджується з матричними приймачами випромінювання з розміром пікселя (25 - 30) мкм.

Терморозфокусування оптичної системи в діапазоні температур від -20°C до 60°C не перевищує 25 мкм, при цьому зміна діаметрів кружків розсіювання в фокальній площині на всьому полі зору системи за умови однорідного температурного розподілу не перевищує 5 мкм. Діаграма кружків розсіювання для температури 60°C наведена на рис. 3.6.

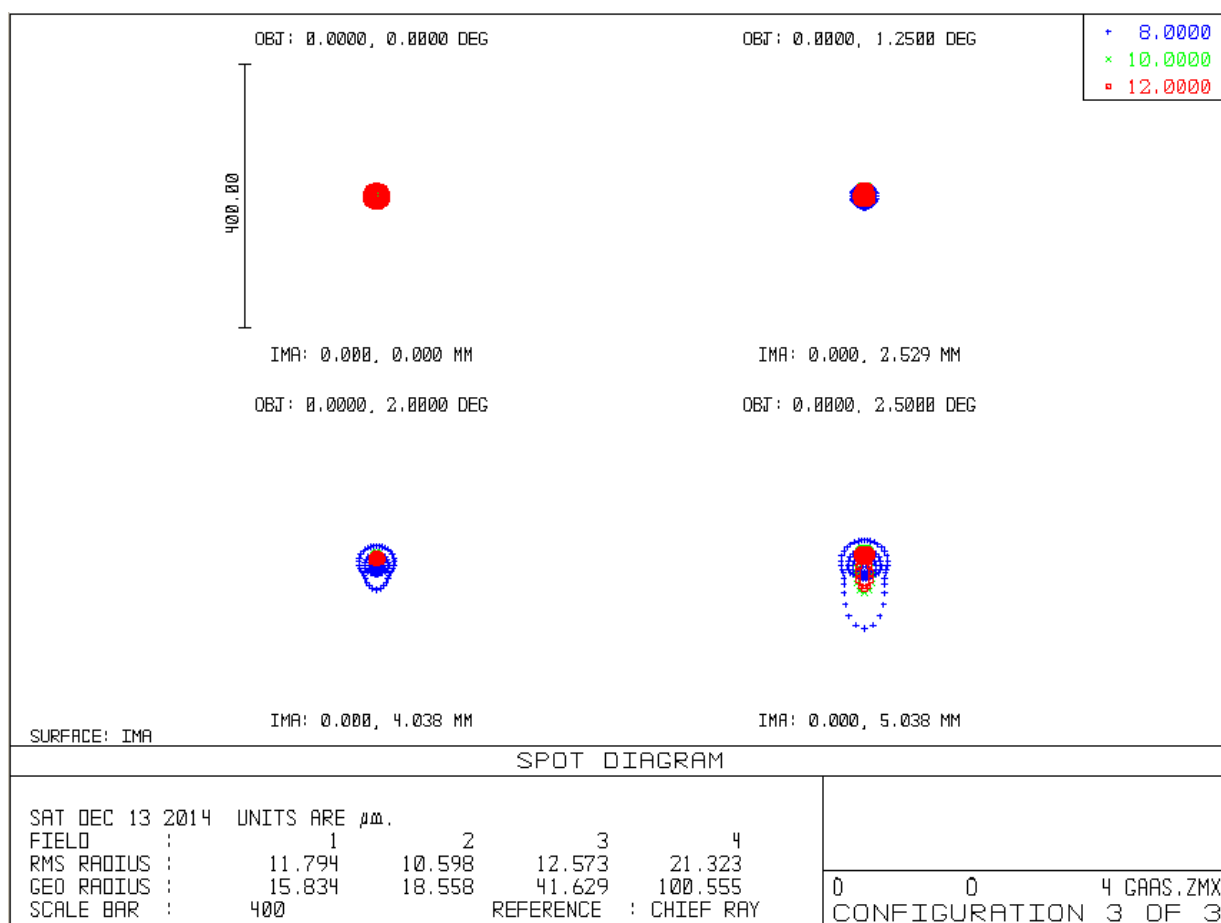
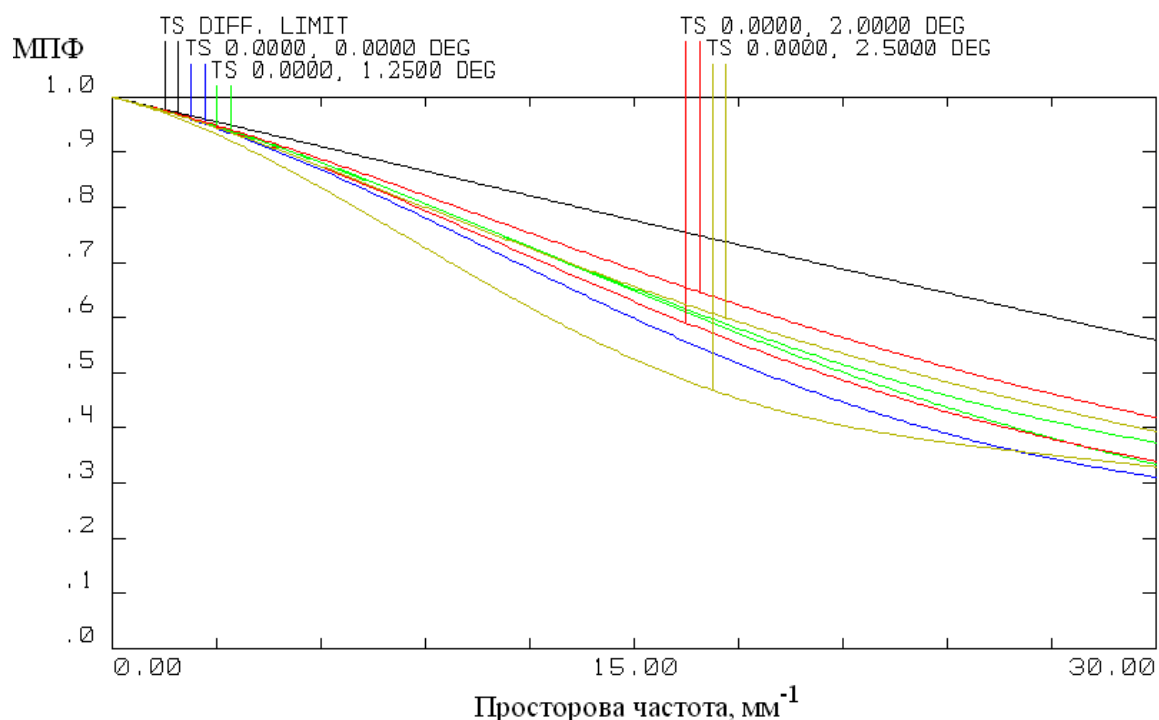


Рис. 3.6 - Діаграма кружків розсіювання в фокальній площині системи при температурі 60°C

МПФ оптичної системи тепловізора представлена на рис. 3.7.



TS – меридіональний та сагітальний перетини відповідно; DIFF. LIMIT – дифракційний ліміт

Рис. 3.7 - МПФ атермалізованої оптичної системи при температурі 20°C

Термооптичний аналіз синтезованої схеми тепловізійної системи спостереження показав, що МПФ оптичної системи на частоті Найквіста для приймача випромінювання з розміром пікселя $25 \times 25 \text{ мкм}$ (частота Найквіста 20 мм^{-1}) змінюється в межах 1% в діапазоні температур від -20°C до 60°C на краю поля зору системи, що підтверджує стабільність характеристик і якості зображення оптичної системи у вказаному температурному діапазоні.

3.5 Аналіз впливу температури на якість зображення неатермалізованого ІЧ об'єктиву

Аналіз неатермалізованих схем об'єктивів-триплетів для ІЧ області спектру, приведених, наприклад, в роботі [6], показав, що при підвищенні температури в оптичній системі з фокусною відстанню 35,49 мм на 40°C (при умові однорідного температурного розподілу)

зміна величини заднього фокального відрізка складає 148 мкм. Максимальна величина терморозфокусування спостерігається у об'єктивів, всі компоненти яких виготовлені з германію. Контраст зображення характеризується МПФ, значення якої для об'єктиву, параметри якого містить робота [6], наведені на рис. 3.8.

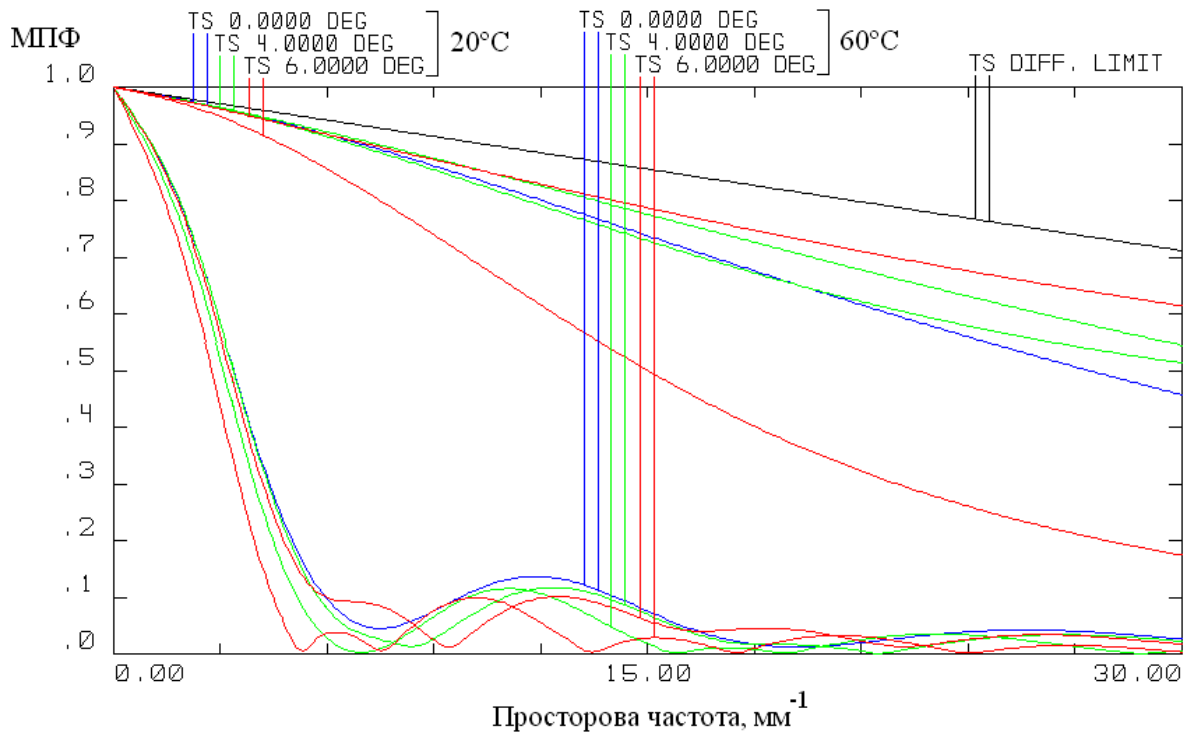


Рис. 3.8 - МПФ неатермалізованої оптичної системи при температурах 20°C та 60°C

З графіку МПФ видно, що на просторовій частоті Найквіста $\mu_H = 20 \text{ мм}^{-1}$ для приймача випромінювання з розміром пікселя $25 \times 25 \text{ мкм}$ на краю поля зору об'єктиву МПФ зменшується на 31% для сагітальної та на 68% для меридіональної площині при зміні температури на 40°C.

Діаграми кружків розсіювання в фокальній площині системи на оптичній осі і для кутів поля зору $\omega = 4^\circ, 6^\circ$ при температурах 20 °C та 60°C подані на рис. 3.9 та 3.10 відповідно.

В результаті терморозфокусування в площині фотоприймального пристрою діаметр кружка розсіювання неатермалізованої системи збільшується в (4 – 6) разів для різних кутів поля зору.

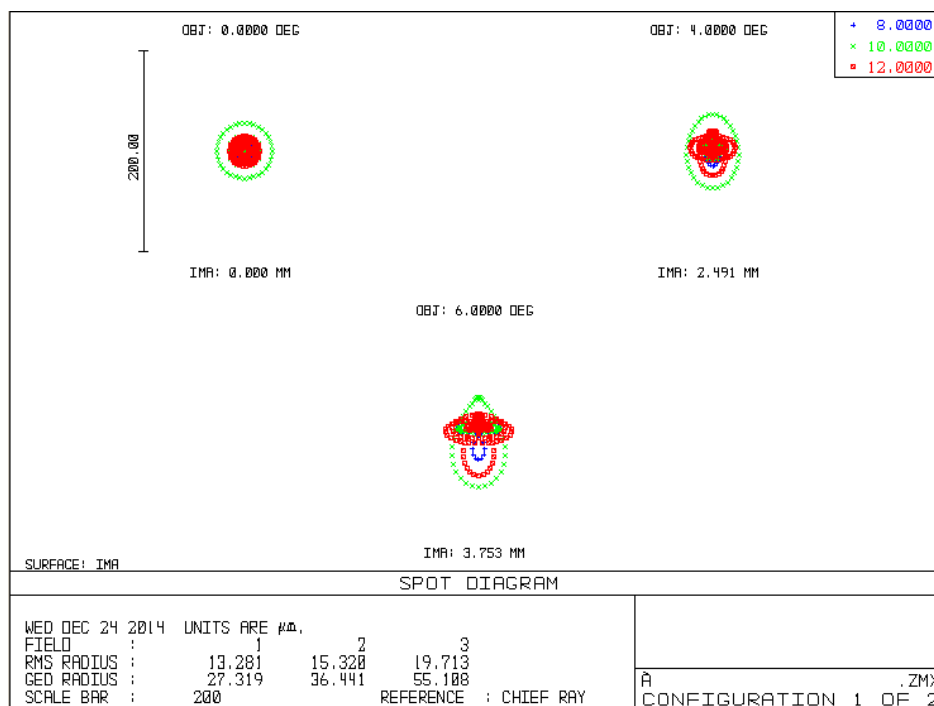


Рис. 3.9 - Діаграма кружків розсіювання в фокальній площині неатермалізованої системи при температурі 20°C

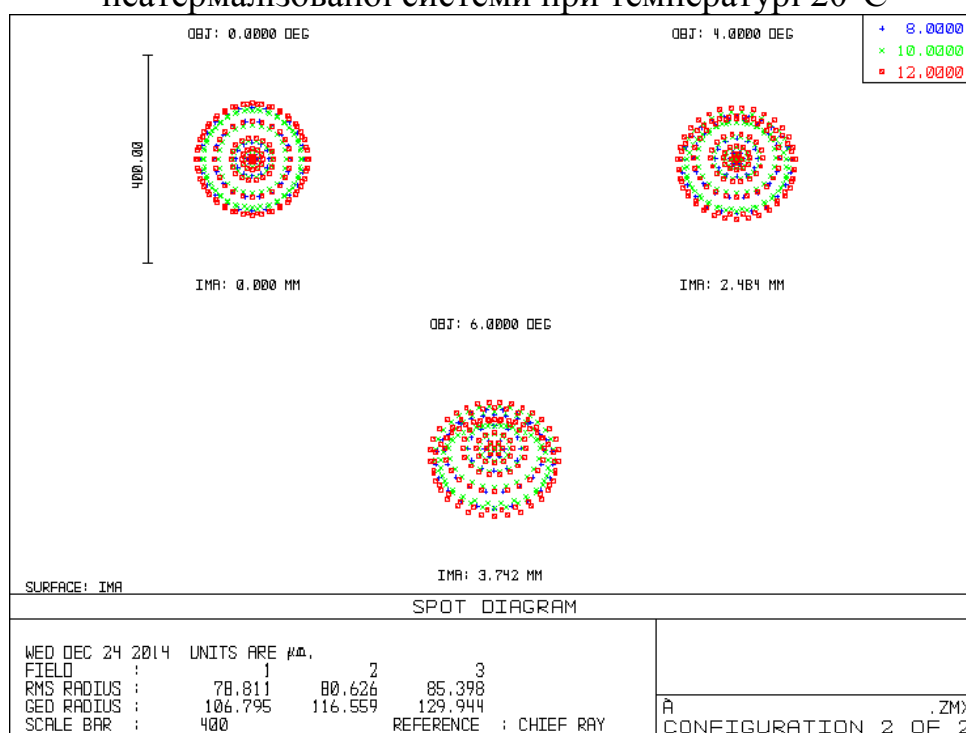


Рис. 3.10 - Діаграма кружків розсіювання в фокальній площині неатермалізованої системи при температурі 60°C

Внаслідок терморозфокусування для неатермалізованого ІЧ об'єктиву порушуються вимоги до контрасту зображення і концентрації

енергії у розмірі пікселя, що приведе до суттєвого погіршення якості його зображення. Це підтверджує необхідність застосування методу пасивної оптичної атермалізації для ІЧ оптичних систем, працюючих в умовах змінної температури навколишнього середовища.

Отже, для підвищення та стабілізації максимальної дальності виявлення об'єктів тепловізійною системою спостереження при проектуванні оптичної схеми необхідно керуватися наступними критеріями: збільшувати світлосилу системи, наносити просвітлюючі покриття на оптичні компоненти для збільшення пропускання випромінювання, всі механічні поверхні оптичного тракту необхідно виконувати матовими, уникати віньєтування для мінімізації власного паразитного випромінювання в системі, враховувати вплив температурних полів на характеристики оптичної системи.

Пасивна оптична термостабілізація ІЧ триплетів здійснюється шляхом визначення оптимальних композицій матеріалів і конструктивних параметрів на підставі даних діаграми $v-vV_r$. При цьому перевагу необхідно віддавати композиціям, що обмежують на цій діаграмі трикутник більшої площі. В ході атермалізації також здійснюється мінімізація аберацій зображення ІЧ триплету, у тому числі й аберацій вищих порядків.

МПФ спроектованої оптичної системи з фокусною відстанню 116.3 мм, відносним отвором 1:0,86, кутом поля зору 5° , кутовим збільшенням $4,7^x$ та спектральним діапазоном роботи (8 – 12) мкм, синтезованої на основі розробленого методу пасивної оптичної атермалізації, на частоті Найквіста 20 мм^{-1} на краю поля зору оптичної системи в діапазоні температур від -20°C до 60°C змінюється в межах 1%, терморозфокусування системи лежить в межах $\pm 25 \text{ мкм}$, що забезпечує стабільність характеристик якості зображення тепловізора у вказаному температурному діапазоні.

Перелік посилань до розділу 3

1. Муравьев А.В. Пассивная оптическая атермализация инфракрасного трехлинзового ахромата / А.В. Муравьев, В.М. Тягур, О.К. Кучеренко // Оптический журнал. – 2014. – том 81. – вып. №4. – С. 42-47.
2. Муравйов О.В. Ахроматизація та атермалізація об'єктивів інфрачервоної техніки / О.В. Муравйов, О.К. Кучеренко, В.М. Тягур // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2012. – №5. – 114-117.
3. Киселев Ю.В., Михеев А.С. Состояние и тенденции развития систем управления огнем новых зарубежных танков // Зарубежная военная техника. Обзоры. Оптика в средствах вооружения и военной технике. – М., 1989, Вып. 6 (98). – С. 3-14.
4. Суворов С., Системы управления огнем танков и БМП // Техника и вооружение. – М., 2004, №12. – С. 24-26.
5. Литвиненко В., Системы управления огнем танков // Зарубежное военное обозрение. – М., 1990, №4. – С. 28-32.
6. Хацевич Т.Н., Журавлев П.В. Инфракрасный светосильный трехлинзовый объектив // Патент России № 2348953. 2009.

4 ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ШЛЯХОМ КОМПЛЕКСУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

Одним з найперспективніших напрямів підвищення ефективності ОЕСС є поєднання інформації з кількох спектральних каналів в один інформаційний канал шляхом їх комплексування. Метою комплексування є підвищення якості вихідної інформації, або – більш узагальнено – ефективності виконання поточної задачі інформаційною системою. В системах дистанційного спостереження комплексуванню підлягає візуальна інформація, тобто зображення. Основними типами комплексування зображень є:

- комплексування зображень з різних сенсорів;
- комплексування зображень з одного сенсора:
- комплексування зображень з різною експозицією;
- комплексування зображень з різним фокусуванням;
- комплексування зображень у часі;
- комплексування зображень з різними викривленнями по полю;
- комплексування зображень різних планів (стерео зображень);
- комплексування зображень з невізуальною інформацією

Для ОЕСС характерним є комплексування першого типу, а інколи – і другого.

4.1 Обґрунтування концепції комплексування зображень

Вибір концепції комплексування інформації в ОЕСС насамперед залежить від вимог до оперативності надходження вхідної і вихідної інформації. Очевидно, що в системах реального часу алгоритми комплексування мають бути значно простішими, ніж в стаціонарних системах обробки і прийняття рішень (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 - Порівняння умов комплексування

Тип системи	Реального часу	Стаціонарна
Час обробки інформації	Мілісекунди	Секунди – десятки хвилин
Тип даних	Сигнал МПВ	Сигнал МПВ та інших датчиків
Розмір бази даних	Малий - середній	Великий
Рівень абстракції	Низький	Високий
Участь оператора	Немає	Часто

Інформативність зображення в ОЕСС залежить від кількості робочих спектральних діапазонів або фізичних полів, в рамках яких збираються дані про простір об'єктів. Дуже важливим є питання про кількість інформаційних каналів, необхідну для надійного розпізнавання зображення оператором. З теорії розпізнавання образів відомо, що при зростанні числа спектральних каналів, точність розпізнавання зростає лише до певного моменту, а потім, при подальшому збільшенні цього числа, вона падає [1]. Це пояснюється тим, що при збільшенні числа інформаційних каналів необхідна оцінка множини статистик все більш високої розмірності по обмеженому фіксованому числу вибірок. При цьому помітно ускладнюється система обробки даних в реальній системі, наприклад, значно збільшується машинний час, необхідний для проведення складних обчислень. Таким чином, існує оптимальна кількість спектральних ознак. Наприклад, при дистанційному зондуванні природних ресурсів було встановлено, що максимум вірогідності розпізнавання по спектральних ознаках досягається при трьох релевантних ознаках. Ймовірність розпізнавання при використанні більшого числа ознак істотно менше [1].

В табл. 4.2 наведені приклади інформаційних каналів деяких

ОЕСС.

Таблиця 4.2 - Типи датчиків для вирішення деяких задач дистанційного моніторингу [2 - 5]

Задача дистанційного моніторингу	Типи датчиків / інформаційних каналів
Метеорологічні спостереження: температурний профіль атмосфери	Пасивні мікрохвильові датчики, тіньові радіо GPS-датчики, тепловізійні системи високого просторового розділення
Метеорологічні спостереження: атмосферний профіль вологості	Пасивні мікрохвильові датчики, пасивні тепловізійні системи ультрафіолетового та видимого діапазонів, тепловізійні системи середнього інфрачервоного діапазону
Моніторинг озонового шару	Пасивні тепловізійні системи ультрафіолетового та видимого діапазонів, тепловізійні системи, мікрохвильові датчики
Моніторинг аерозолів, визначення метеорологічної дальності бачення	Телевізійні системи видимого діапазону, тепловізійні системи близького та середнього інфрачервоного діапазонів
Визначення вмісту парникових газів в атмосфері	Тепловізійні системи
Визначення розподілу вітрів	Телевізійні системи видимого діапазону, тепловізійні системи, доплерівські лазерні вимірювачі швидкості
Визначення рівня океану, стану його поверхні	Лазерні висотоміри, скатерометри
Визначення температури суші та океану	Тепловізійні системи, мікрохвильові датчики
Визначення забарвлення океану, концентрації хлорофілу	Відеспектрометри
Моніторинг та картографування озер	Телевізійні системи видимого діапазону, тепловізійні системи близького інфрачервоного діапазону, радіолокатори з синтезованою апертурою, висотоміри
Моніторинг льодовиків і льодового покриву	Телевізійні системи видимого діапазону, тепловізійні системи близького та середнього інфрачервоного діапазонів

Задача дистанційного моніторингу	Типи датчиків / інформаційних каналів
	високого розділення, висотоміри
Моніторинг снігових покривів	Телевізійні системи видимого діапазону, тепловізійні системи близького та середнього інфрачервоних діапазонів середнього розділення, пасивні мікрохвильові датчики
Визначення альбедо земних поверхонь	Панхроматичні та багатоканальні телевізійні системи видимого діапазону, відеоспектрометри
Глобальний моніторинг земної біомаси	L / P полосні радіолокатори з синтезованою апертурою, лазерні висотоміри
Моніторинг вологості ґрунту (до 100 мм глибини)	Активні та пасивні мікрохвильові датчики
Оглядові системи військового призначення	Телевізійні системи видимого діапазону, тепловізійні системи близького, середнього та довгохвильового інфрачервоних діапазонів, низькорівневі телевізійні системи
Прицільно-оглядові системи військового призначення	Телевізійні системи видимого діапазону, тепловізійні системи, лазерний цілевказівник
Медична діагностика пухлин, маммографія	Телевізійні системи видимого діапазону, довгохвильові тепловізійні системи
Спостереження навколишнього простору самохідними роботизованими пристроями	Лазерні скануючі далекомірні системи, телевізійні системи видимого діапазону
Картографування	Панхроматичні та багатоканальні телевізійні системи видимого діапазону, радіолокатори з синтезованою апертурою, координатні датчики (інерціальні, GPS)
Стереофотограмметрія	Панхроматичні та багатоканальні телевізійні системи, лазерні далекоміри
Огляд транспортних засобів службами безпеки	Телевізійні системи видимого діапазону, тепловізійні системи, лазерні скануючі далекомірні системи, датчики гамма-хвиль та нейтронів

Вихідним сигналом майже всіх ОЕСС, що наведені в табл. 4.2, є двомірне зображення на одному моніторі. Це зображення аналізується оператором шляхом виявлення в ньому релевантних (важливих для заданої задачі) ознак з метою діагностування стану окремих об'єктів чи всього простору об'єктів. Найголовнішою задачею процесу комплексування є об'єднання різних інформаційних потоків для одержання нової інформації про досліджуваний об'єкт, яка не є доступною в кожному окремому каналі. В цьому сенсі роботу окремих каналів можна уявити як перенос інформації від об'єкта до оператора, а функція самої ОЕСС полягає в формуванні оптимальної конфігурації інформаційного каналу. Для цього необхідно мати ефективний механізм комплексування каналів [4]. Такий механізм є інтерфейсом між простором об'єктів, окремими інформаційними каналами ОЕСС, змістом поточного завдання і зовнішніх умов його виконання, оператором [6]. Тому крім дослідження кожної з наведених складових інформаційного процесу, актуальними напрямками в галузі іконічних систем дистанційного зондування є саме створення механізмів комплексування каналів.

Задачі розпізнавання та ідентифікації об'єкту на комплексованих кольорових зображеннях вирішуються операторами як правило швидше, ніж на зображеннях з окремих каналів, або на комплексованих монохромних зображеннях [7, 8]. В деяких випадках монохромні методи комплексування дають гірші результати, ніж окремі канали [8].

4.2 Методи комплексування зображень

Для дослідження особливостей комплексування інформації в ОЕСС і розробки нових методів схему проходження сигналу в ОЕСС доцільно конкретизувати в частині обробки сигналів (рис. 4.1).

Питання реєстрації зображень є темою окремого розгляду. Далі дослідимо придатність відомого інструментарію комплексування для вирішення типових для ОЕСС задач.

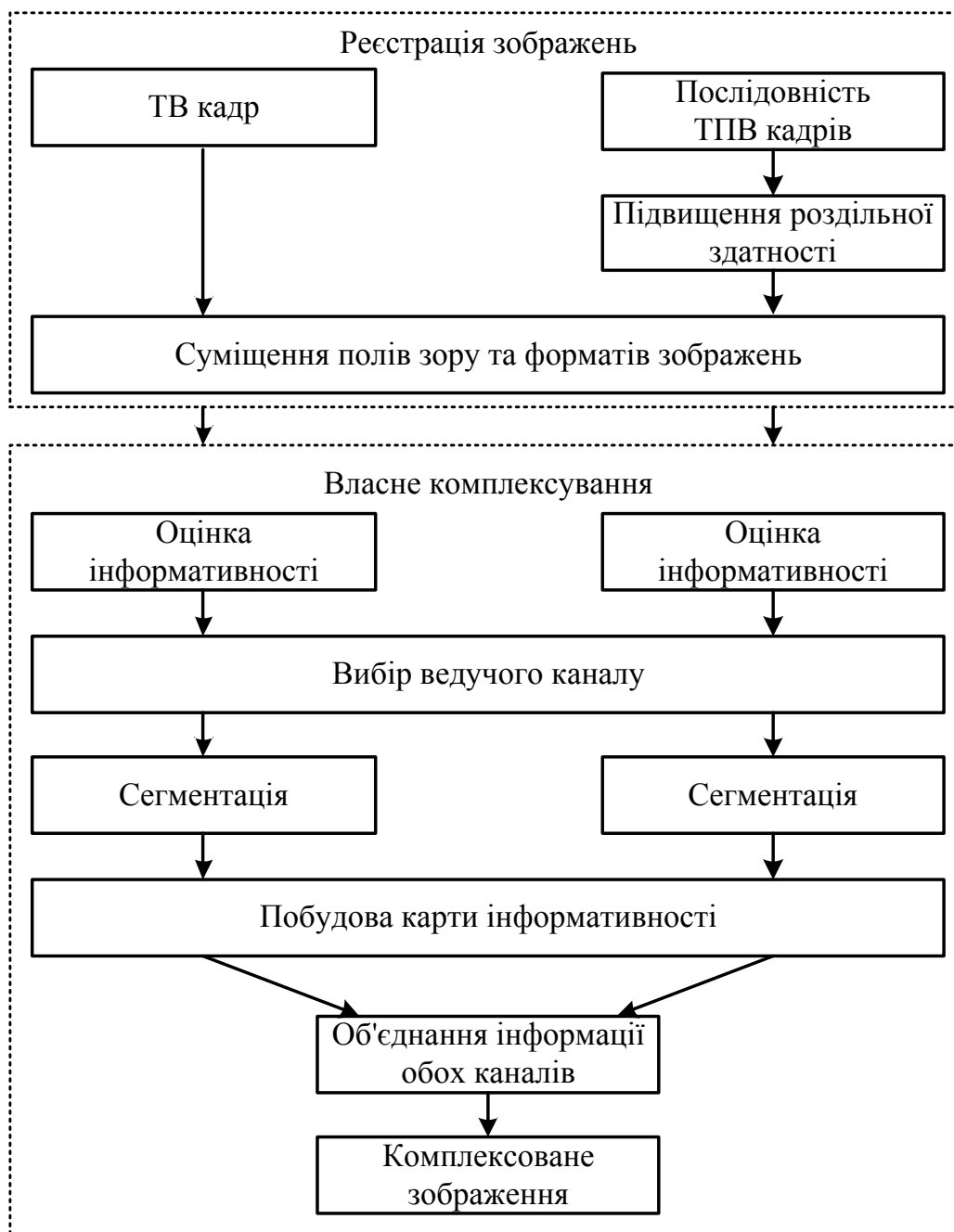


Рис. 4.1 - Узагальнена схема комплексування в ОЕСС

Загальновідома модель комплексування інформації [9], що була запропонована американською спілкою директорів лабораторій (JDL), є ієрархічною та багаторівневою (рис. 4.2).

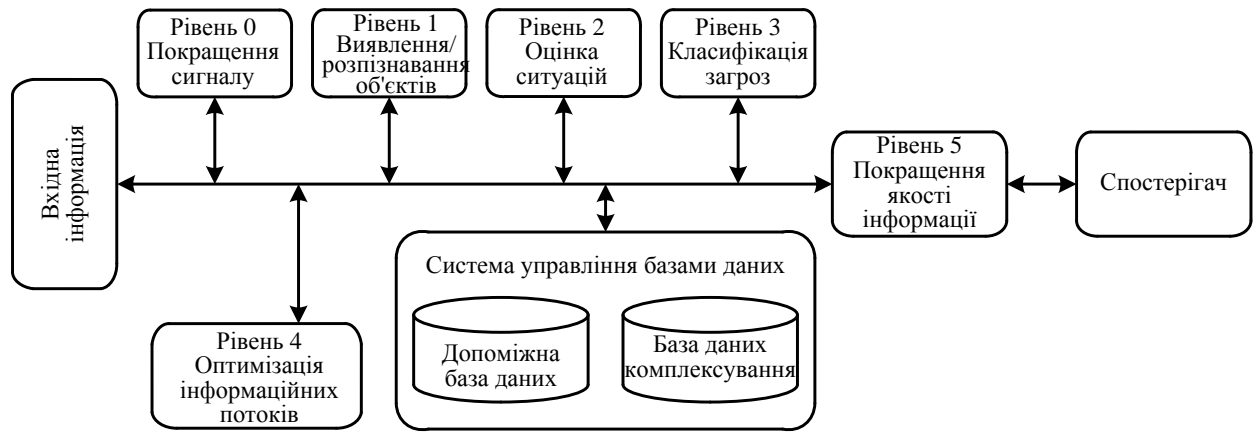


Рис. 4.2 - Модель комплексування інформації JDL

Вхідна інформація може надходити з різних локальних або розподілених датчиків, фізично зв'язаних з системою комплексування, з інших джерел знань.

Нульовий рівень (розподілення процесів) обробки сигналу забезпечує підвищення ефективності комплексування шляхом розподілу сигналів по відповідним блокам обробки виходячи з конкретної поточної задачі. Наприклад, ознаки розташування об'єкта направляються на перший рівень виявлення, а ознаки загроз – на другий рівень. На цьому етапі можуть бути задіяні методи виявлення сигналів.

Перший рівень – виділення релевантних ознак – призначений для виявлення з потоку даних характеристик конкретних об'єктів в полі зору. На цьому етапі вирішуються чотири основні задачі: визначення положення всіх об'єктів в полі зору, визначення параметрів руху об'єктів, розподілення інформації між об'єктами, класифікація об'єктів.

На другому рівні (оцінка ситуації) встановлюються взаємні зв'язки

між об'єктами і явищам в полі зору. Виявляється характер взаємодії встановлених на першому рівні параметрів окремих об'єктів в контексті фоноцільової обстановки (ФЦО). При обробці додатково враховується вся доступна інформація про ФЦО і умови роботи (стан атмосфери, час, характер території тощо). Методи обробки на цьому рівні базуються на моделях візуального сприйняття та інтерпретації інформації спостерігачем.

Третій рівень (оцінка загроз) є прогностичним. На цьому етапі оцінюється подальший розвиток поточної ситуації. Тут враховуються апріорні знання і гіпотези про поведінку об'єктів, застосовуються різні методи теорії ігор.

Четвертий рівень (покращення процесу) оптимізує всі інші процеси комплексування. Він обіймає чотири ключові задачі – оцінку поточної і прогнозування майбутньої ефективності комплексування, виявлення інформації, яка є необхідною для покращення процесу комплексування, визначення джерела найбільш релевантної на даному етапі інформації, перерозподіл інформаційних потоків для найкращого виконання задачі. В той час як джерела інформації четвертого рівня і відповідні інформаційні процеси можуть бути відокремленими від аналізованої системи, цей рівень тільки частково належить до локального середовища комплексування.

П'ятий рівень (покращення процесу пізнання) передбачає підвищення якості сприйняття інформації оператором. Причому крім покращення візуального сприйняття (тривимірні монітори, автоматичне розпізнавання жестів та відслідковування напрямку зору, сенсорні монітори) на цьому рівні застосовуються всі можливі впливи – звукові, тактильні тощо. Інтерфейс "комп'ютер – оператор" має бути максимально "дружнім" і сприятливим для діяльності оператора.

В залежності від того, які дані використовуються при комплексуванні можна виділити наступні категорії комплексування [10]:

- комплексування зображень, отриманих від приймачів одного типу в один і той же час, але з різних точок зору (multiview fusion);
- комплексування зображень, отриманих від приймачів різних типів: інфрачервоні зображення з телевізійними, дані панхроматичної та спектральної зйомки і т.п. (multimodal fusion);
- комплексування зображень, отриманих в різний час з метою виявлення змін між ними або для синтезу зображень, в яких усунуті перешкоди, що заважають спостереженню об'єктів в певні періоди часу (multitemporal fusion);
- комплексування зображень, отриманих при різних фокусних відстанях об'єктиву (multifocus fusion);
- комплексування двох або більше зашумлених, спотворених зображень однієї і тієї ж картини з метою отримання комбінованого зображення покращеної якості – вільного від шуму та змазу (fusion for image restoration);
- комплексування спотворених зображень низького розділення з метою отримання комбінованого зображення високого розділення (super resolution fusion).

У випадку ОЕСС найбільш актуальним є комплексування зображень, отриманих від приймачів різних типів, зокрема телевізійного та тепловізійного зображень.

Для кожної категорії комплексування використовують відповідні методи, що визначаються рівнем комплексування (рис. 4.3):

- пристрої комплексування на рівні пікселів (датчиків);
- пристрої комплексування на рівні релевантних ознак (узагальнених параметрів);

- пристрої комплексування на рівні прийняття рішень.

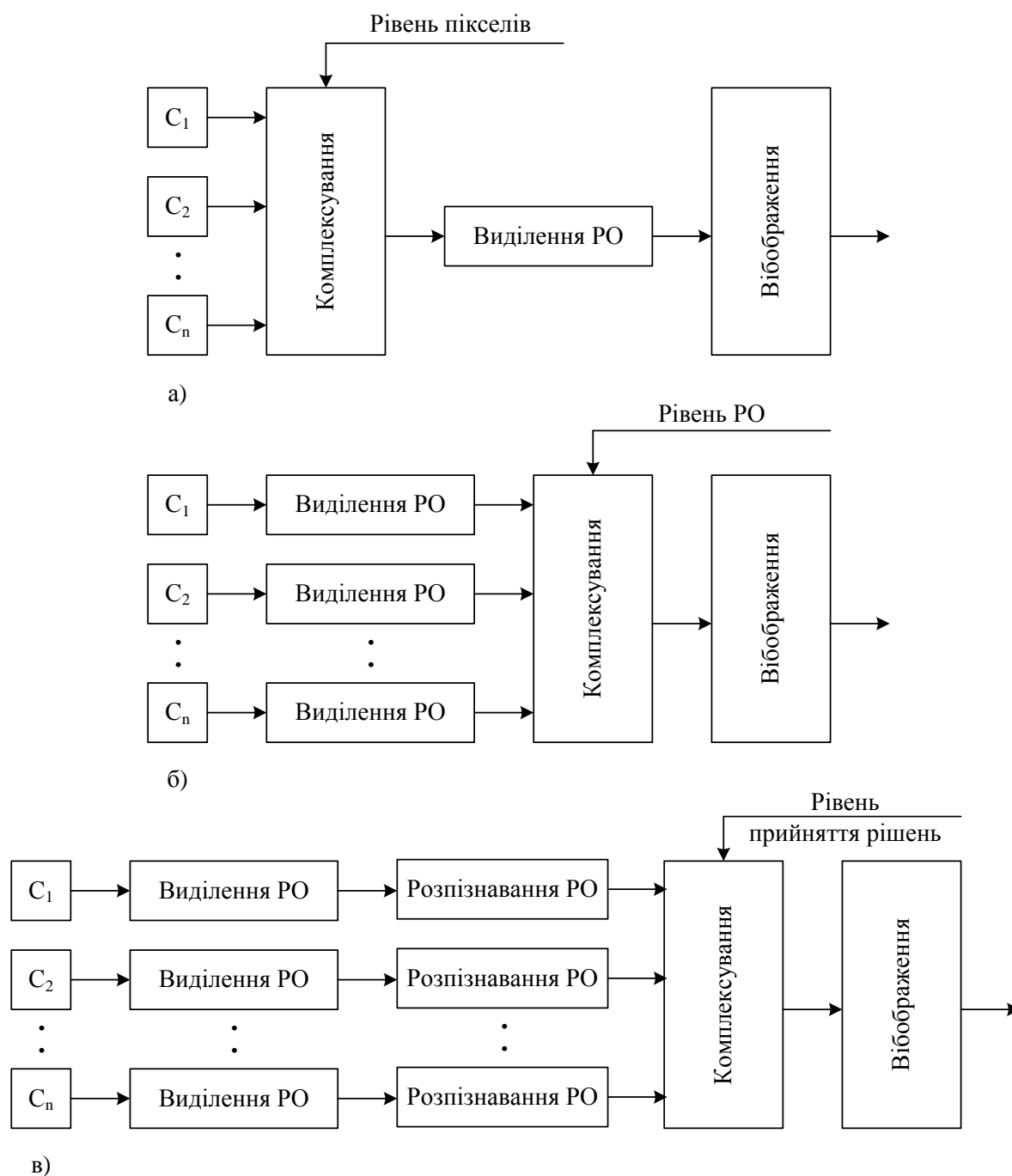


Рис. 4.3 - Структури комплексування в ОЕСС

Методи комплексування на рівні пікселів є найбільш простими в плані математичних розрахунків, а отже й найбільш поширеними [11]. При комплексуванні на рівні пікселів результуюче зображення отримуємо шляхом математичних операцій над окремими пікселями

або невеликими по площі областями пікселів вхідних зображень. Необхідною умовою ефективності методів даної групи є якісна попередня реєстрація вхідних зображень.

Об'єктами для комплексування на рівні релевантних ознак є не окремі пікселі, а певні характерні області вхідних зображень. В даному випадку виділення релевантних ознак здійснюється незалежно в кожному каналі.

Методи комплексування на рівні релевантних ознак розвинуті значно менше і з'явилися значно пізніше, ніж алгоритми комплексування на рівні пікселів. Це пов'язано з обчислювальною складністю даних алгоритмів, а також відсутністю універсальних алгоритмів сегментації та розпізнавання. Проте алгоритми комплексування на рівні релевантних ознак мають суттєві переваги над алгоритмами комплексування на рівні пікселів, якщо застосовуються для обмеженого класу зображень. Основна різниця між алгоритмами даного класу полягає в принципі сегментації, що використовується для виділення характерних ознак вхідних зображень [12 - 14].

Комплексування на рівні прийняття рішень є менш поширеним та дещо ізольованим. Причиною цього є те, що результатом комплексування є не комбіноване зображення, а деяке судження, яке містить більш інформативний опис реальної картини [15, 16].

Рішення про застосування кожного з алгоритмів потрібно приймати в залежності від джерел інформації (категорії комплексування). Комплексування на рівні пікселів застосовується, коли джерела зображень близькі по своїм характеристикам, наприклад при комплексуванні зображень одного спектрального діапазону, але з різною роздільною здатністю, або отриманих в різний час. Комплексування на рівні релевантних ознак необхідно застосовувати, коли ступінь розбіжності між джерелами зображень вище, але області

підвищеного інтересу можуть бути асоціативно пов'язані. Комплексування на рівні прийняття рішень застосовується в тих випадках, коли вхідні зображення значно відрізняються по своїм характеристикам одне від одного.

Для ОЕСС, які застосовуються для запобігання аварійним ситуаціям за рахунок аномальних тепловиділень, перспективним є поєднання алгоритмів комплексування на рівні пікселів та рівні релевантних ознак.

На кожному рівні комплексування використовують відповідні методи комплексування (рис. 4.4).



Рис. 4.4 - Ієрархія методів комплексування [17]

Методи комплексування на рівні пікселів поділяють на методи багатомасштабного розкладу (Multiscale Decomposition Based Methods) та методи без багатомасштабного розкладу (Non Multiscale Decomposition Based Methods).

До методів без багатомасштабного розкладу відносять: лінійні методи, методи спектрального кодування та нелінійні методи.

Найбільш простими є лінійні методи. Суть даних методів полягає в тому, що кожен піксель результуючого (комплексованого) зображення отримують шляхом додавання значень яскравості відповідних пікселів вхідних зображень, помножених на певний ваговий коефіцієнт. Вагові коефіцієнти можуть бути попередньо задані або розраховані в процесі виконання алгоритму комплексування. В останньому випадку мають справу з методами адаптивного визначення коефіцієнтів, які в свою чергу поділяються на дві групи: з використанням апріорних даних та без використання апріорних даних. Згідно закордонних джерел, найбільш ефективними лінійними методами з використанням апріорних даних для визначення вагових коефіцієнтів є статистичні методи, а без використання апріорних даних – методи із застосуванням нейронних мереж. Одним з найбільш розповсюджених адаптивних методів є метод аналізу головних компонент.

Суть методів спектрального кодування полягає в тому, що кожному вхідному зображенню виділяється свій піддіапазон із діапазону видимих частот. Таким чином, на результуючому зображенні будуть присутні всі елементи вхідних зображень, але забарвлені різним кольором в залежності від того, на якому із вхідних зображень вони є більш інформативними. Методи спектрального кодування часто використовуються в поєднанні з іншими методами.

Принцип роботи нелінійних методів полягає в тому, що вхідні зображення поділяються на дві складові, частіше за все низькочастотні та високочастотні. Кожна із складових підлягає подальшій обробці (фільтрації) незалежно від іншої. Потім відбувається комплексування відповідних компонент як самостійних зображень за допомогою будь-

якого лінійного методу з подальшим їх об'єднанням в результуюче зображення.

Методи багатомасштабного розкладу передбачають багатомасштабний розклад вхідних зображень (MST – multiscale transform) з подальшим об'єднанням утворених складових згідно певного правила комплексування в комбіноване багатомасштабне представлення результуючого зображення. Саме ж результуюче зображення отримують шляхом оберненого багато масштабного розкладу. На рис. 4.5 представлена узагальнена схема комплексування зображень, основана на методах багатомасштабного розкладу.

Найбільш розповсюдженими методами багатомасштабного розкладу є: пірамідальні схеми (піраміда Лапласа [18], контрастна піраміда [19], градієнтна [20], морфологічна [21], управляюча [22]), дискретне вейвлет перетворення (discrete wavelet transform - DWT) [23, 24], перетворення дискретних вейвлет кадрів (discrete wavelet frame – DWF) [25] та інваріантне до зсувів вейвлет перетворення [26].

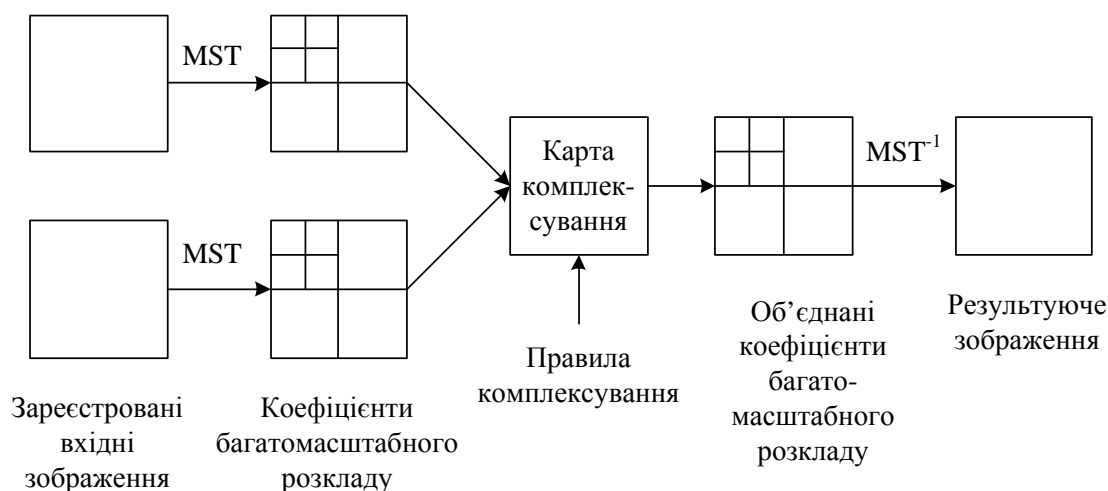


Рис. 4.5 - Узагальнена схема комплексування зображень

Методи комплексування на рівні характерних ознак поділяються за двома критеріями – методи прямої та опосередкованої оцінки, одноступеневі та багатоступеневі. Методи прямої оцінки працюють

безпосередньо з яскравістю вхідних зображень. За допомогою спеціальної функції на зображеннях виділяються потенційно інформативні області. При застосуванні методів опосередкованої оцінки вхідне зображення попередньо обробляється спеціальними операторами з метою усунення імпульсного шуму та/або підкреслення інформативних зон.

Одноступеневі методи працюють з оригінальними вхідними зображеннями. Багатоступеневі – із зображеннями, обробленими низькочастотними та високочастотними фільтрами. Відповідно області інтересу виділяються окремо на низькочастотних та високочастотних складових вхідних зображень.

Принцип подальшої обробки майже однаковий для всіх методів даного рівня. Після знаходження меж та виділення областей проводиться їх аналіз. Він виконується по ряду ознак, що мають потенційний інтерес для спостерігача. Це можуть бути морфологічні, топологічні, ознаки яскравості та інші. Після аналізу здійснюється перенесення областей інтересу із вхідних зображень в єдине результуюче.

Отже, найбільш розповсюдженими на сьогоднішній день методами комплексування є метод усереднення, метод головних компонент, піраміда Лапласа, контрастна піраміда, градієнтна піраміда, морфологічна піраміда, вейвлет перетворення та інваріантне до зсувів вейвлет перетворення.

На основі вищесказаного, задачею комплексування є така обробка вхідних зображень, яка дозволяла б отримувати результуюче зображення з:

- 1) Максимальною кількістю інформативних елементів, що присутні у вхідних зображеннях;

2) Мінімальною кількістю завад, що присутні у вхідних зображеннях.

Складність вирішення поставленої задачі полягає у відсутності кількісної міри, що дозволяла б однозначно оцінити ступінь інформативності або зашумленості того чи іншого зображення. Крім того відсутні універсальні методи оцінки якості результату комплексування, які максимально корелювались би із суб'єктивним сприйняттям оператора.

Методи оцінки якості результату комплексування. Оцінку якості зображень зазвичай здійснюють за допомогою суб'єктивної експертизи, оскільки вона дає найбільш достовірні дані. Поряд з тим, активно ведуться розробки по створенню об'єктивних методів, які б максимально співпадали із суб'єктивними оцінками операторів.

4.3 Типові задачі комплексування в ТПСС

На практиці для ОЕСС наземного базування є кілька типових ситуацій, в яких комплексування може значно підвищити ефективність функціонування багатоканальної системи.

4.3.1 Спостереження в тумані чи в диму

Серед систем цілодобового візуального спостереження найбільш поширеними є пасивні двоканальні ОЕСС. Вони працюють здебільшого в видимому і середньому ($\Delta\lambda = 8 - 14$ мкм) ІЧ діапазонах спектру та дозволяють проводити цілодобові спостереження: вдень – за допомогою видимого каналу, вночі – ІЧ каналу. Вибір робочого каналу як правило здійснюється при зменшенні освітленості простору предметів ввечері, або його збільшенні вранці. Проте навіть вдень можливі різкі зміни розподілення освітленості в просторі предметів і контрасту на вході БК ОЕСС. Наприклад, при спостереженнях в тумані

об'єктів, які розміщені на різних відстанях від ОЕСС. За таких умов ефективність візуального спостереження видимих або ІЧ зображень змінюватиметься і може виникнути доцільність використання не тільки видимого, але й ІЧ каналу. На практиці використовуються два режими роботи двоканальної ОЕСС – паралельний і послідовний. Зазвичай складні алгоритми обробки зображень використовуються при відкладеному в часі комплексуванні, а для відображення інформації в реальному масштабі часу застосовуються найпростіші алгебраїчні алгоритми комплексування. Прості алгоритми комплексування є ефективними здебільшого при спостереженнях об'єктів на рівномірних фонах. Для виявлення та розпізнавання об'єктів у складних ФЦО без суттєвого ускладнення ОЕСС доцільнішим може виявитись використання послідовного режиму роботи каналів.

З огляду на здебільшого матричний характер зображень в кожному спектральному каналі типовим і ефективним алгоритмом комплексування на рівні датчиків є попіксельне обчислення нормованої суми зважених сигналів двох (або більшої кількості) каналів [27]:

$$U_k^i = \frac{U_B^i (w_B^i + v_B^i) + U_{IЧ}^i (w_{IЧ}^i + v_{IЧ}^i)}{(w_B^i + v_B^i) + (w_{IЧ}^i + v_{IЧ}^i)}, \quad (4.1)$$

де U_k^i - комплексований сигнал i -го пікселя; U_B^i , $U_{IЧ}^i$ - сигнал з i -го пікселя в видимому та інфрачервоному піддіапазонах відповідно; w_B^i , $w_{IЧ}^i$ - вагові коефіцієнти «поточної важливості» видимого та інфрачервоного каналів відповідно; v_B^i , $v_{IЧ}^i$ - локальні відношення «сигнал/шум» в каналах.

В сигналах U_B^i , $U_{IЧ}^i$ в формулі (4.1) мають бути попередньо скомпенсовані геометричні викривлення (наприклад, ті, що викликані турбулентністю атмосфери) та видалені імпульсні шуми. Поняття «поточної важливості» залежить від контексту виконуваної задачі.

Наприклад, для візуального каналу цим показником може бути величина локальної зміни яскравості зображення (тобто – контурна інформація), для інфрачервоного каналу – виражений енергетичний контраст.

Така ж ситуація мала місце в натурному експерименті при спостереженнях міського ландшафту в умовах туману взимку (рис. 4.6).



а) ТВ канал



б) ТПВ канал

Рис. 4.6 - Зображення залізничної сортувальної станції

Було встановлено, що на близьких дистанціях візуальне виявлення і візуальне розпізнавання об'єктів ефективніше при роботі з видимим каналом. При збільшенні відстані спостереження переваги видимого каналу зменшувались. На великих відстанях ТВ канал практично ставав неефективним: стан будівель на горизонті (рис. 4.6, $l = 850 - 900$ м) цілком задовільно оцінювався по тепловізійному зображенню, в той час, як видимий канал не давав змоги їх навіть виявити. Головними причинами такої ситуації очевидно є, по-перше, більш різкий спад $\tau_a(\lambda, l)$ в умовах туману на короткохвильових ділянках спектру; по-друге, перевага для заданих погодних умов теплових контрастів над видимими для штучних об'єктів, які мають джерела енергії. Ймовірно,

що другий фактор залежить від часу дня, кліматичних і сезонних умов. Тому при подальших дослідженнях ці чинники мають бути включені в математичну модель в явному вигляді.

Виявлені закономірності дають змогу оптимізувати послідовний режим роботи двоканальної ОЕСС з врахуванням особливостей зорового сприйняття оператора або розробити алгоритм комплексування зображень для відображення одного синтетичного зображення.

Серед трьох основних рівнів комплексування [11] найпростішим і найшвидшим є рівень пікселів. Ефект від такого комплексування є особливо відчутним при роботі в майже реальному масштабі часу з зображеннями з однаковими релевантними ознаками, або ж з задачами, які можуть бути зведені до виявлення об'єктів з відносно невеликим алфавітом. Класичним прикладом є ОЕС для дистанційної діагностики і енергетичного аудиту будівель. В цьому випадку спостереження ведуться вдень, значні завади відсутні, ослаблення випромінювання атмосферою мінімальне і зображення в кожному з каналів в значній мірі формуються елементами конструкцій. Інформація в каналах зазвичай має форму двох паралельних відеопослідовностей, кожна з яких складається з окремих повних кадрів. Для сумісної обробки сигналів двох амплітудних матриць, якими є кадри, можна застосувати один з показників подібності. Наприклад, коефіцієнт кореляції, показник взаємної інформації MI (mutual information), статистичну розбіжність.

Показник взаємної інформації MI як ентропійна міра взаємної залежності двох випадкових дискретних сигналів A і B (а саме такі сигнали формуються матричними ПВ) має вигляд:

$$MI(A, B) = \sum_i \sum_j P(A_i, B_j) \log_2 \frac{P(A_i, B_j)}{P(A_i) \cdot P(B_j)}, \quad (4.2)$$

де $P(A_i, B_j)$ - умовна ймовірність реалізацій A і B ; $P(A_i)$, $P(B_j)$ - безумовні ймовірності реалізацій A і B .

Цей показник був застосований при проведенні натурного експерименту з реєстрацією змістовного зображення міського ландшафту (рис.4.7). Він підтвердив ефективність показника МІ для суміщення зображень за наявності контрастних релевантних елементів.



а) діапазон $\Delta\lambda_2=7,5 - 13,0$ мкм



б) діапазон $\Delta\lambda_1=0,45 - 0,85$ мкм

Рис. 4.7 - Зображення будівлі в двоканальній ОЕСС

В системах з слабкою статистичною залежністю між сигналами каналів часто інформативна якість каналів є різною і апріорно невідомо, який з каналів слід вважати основним. Очевидно, що в цьому разі алгоритм комплексування має враховувати процедуру прийняття рішень кінцевою ланкою всієї інформаційної системи (в випадку іконічних систем необхідно враховувати особливості зорового сприйняття оператора).

Одним з напрямків комплексування зображень є аналіз і комбінуванні спектрів Фур'є локальних околиць зображень. Такі методи, як правило, можуть бути застосованими для будь-якої кількості каналів спостереження і не залежать від їх спектрального діапазону. Для формування фази комплексованого зображення можна аналізувати ступінь анізотропії поточної околиці кожного з початкових зображень.

Вибирається канал з максимальною анізотропією. Амплітуда комплексованого зображення поступає з каналу, вибраного апріорі, або з каналу, який в процесі роботи є кращим по критерію максимуму дисперсії.

Таким чином, для формування підсумкового зображення $u_s(m,n)$ з декількох результатних необхідно вибрати зображення $u_1(m,n)$ із спектром $F_1(\omega_1, \omega_2)$, що поставляє амплітудну частину, і зображення $u_2(m,n)$ із спектром $F_2(\omega_1, \omega_2)$, що поставляє фазову частину. Причому зображення $u_1(m,n)$ і $u_2(m,n)$ можуть співпадати. Синтезована спектральна матриця формується таким чином:

$$F_s(0,0) = F_1(0,0), F_s(\omega_1, \omega_2) = F_2(\omega_1, \omega_2), \text{ при } \omega_1, \omega_2 \neq 0. \quad (4.3)$$

Швидкий алгоритм комплексування відновлює елемент $u_s(0,0)$, для чого не потрібно обчислювати спектр Фур'є:

$$u_s(0,0) = u_2(0,0) + (F_1(0,0) - F_2(0,0))/N^2, \quad (4.4)$$

де N - лінійний розмір околиці.

4.3.2 Компенсація вібрацій і зсувів

В сенсі зменшення змазування та геометричних спотворень комплексування не може точно відновити оригінальне зображення $o[x,y]$, але дозволяє підвищити просторове розділення порівняно з одиничним кадром.

Комплексування зображення g_k складається з трьох етапів: реєстрації зображення (з компенсацією геометричних деформацій W_k), подальшої зворотної згортки (багатоканальної чи багатокadroвої в залежності від типу ОЕСС) та підвищення просторового розділення. Другий етап безпосередньо стосується усунення впливу просторового змазування зображення. Його доцільно об'єднати з третім етапом, в результаті якого має бути одержане досить якісне зображення.

4.3.3 Підвищення інформативності зображень

Найбільш наочно ефект розширення інформаційного об'єму проявляється при комплексуванні ознак в семантичному просторі.

Перед безпосередньо процесом комплексування виконується радіометрична і геометрична корекція сигналів в каналах. На цьому етапі в разі комплексування на рівні чутників необхідно витримати дуже високу точність – адже всі алгоритми цього рівня є дуже чутливими до геометричної неузгодженості. Також в залежності від вибраної стратегії комплексування на попередньому етапі можуть відфільтровуватись шуми (особливо – спекл-шуми для радарів з синтезованою апертурою, в системах з активним каналом).

Іноді, при великій різниці в роздільній здатності комплексованих зображень, передискретизація у більш високо роздільний формат може супроводжуватись виникненням блочної структури зображення. Для уникнення цього на попередньому етапі використовують згладжуючу фільтрацію.

Допустима кількість окремих інформаційних каналів відрізняється в різних алгоритмах комплексування, наприклад, відомий метод IHS є обмеженим за цим параметром. Тому в ряді випадків необхідно відібрати тільки ті канали, інформація в яких є потенційно найбільш цінною для поточної задачі. Широкого розповсюдження набули статистичні алгоритми, за якими інформаційна місткість каналу визначається максимальною мінливістю даних в ньому.

Іншими алгоритмами зменшення кількості інформаційних каналів є аналіз головних компонентів (PCA) [28], статистичні алгоритми оцінки кореляції між зображеннями в каналах [29].

Великий обсяг алгоритмів комплексування розробляється для кольорових зображень. В цілому ці алгоритми можна розділити на дві великі групи: ті, що використовують як аргумент функцій координати

кольору; ті, що використовують кольоровість. В першому випадку результуючий колір визначається за координатами на хроматичних діаграмах. Представлення другої групи використовують яскравість об'єкта, інтенсивність тону і насиченість. Часто для визначення кольору використовується декартова система координат RGB. Це зручно з огляду на те, що в цій системі визначаються кольори на моніторі.

Метод композитних кольорів (RGB). Цей метод дозволяє відтворювати кольорове зображення як суміш трьох чистих кольорів – червоного, зеленого, голубого [30]. Він дозволяє реалізовувати багато варіантів за рахунок співставлення шкали сірого з окремими кольорами з різними ваговими коефіцієнтами. Легко здійснюється виділення потенційно цікавих об'єктів кольором. Комплексування методом композитних кольорів успішно використовується при обробці космічних зображень з радарів з синтезованою апертурою, наприклад для супутника ERS-1 [30], а також для сумісної обробки таких зображень з інформацією оптичних каналів. Часто цей метод використовують разом з іншими (IHS, PCA тощо) позаяк він не може забезпечити чітку кореляцію інформації між спектральними каналами.

Метод "інтенсивність – тон – насиченість" (IHS) є одним з найпоширеніших для обробки і комплексування зображень високого просторового розділення з панхроматичного каналу і низького просторового розділення зі спектральних каналів [31, 32]. Цей метод використовується для покращення передачі кольорів, виділення релевантних ознак, підвищення просторового розділення. Алгоритм IHS побудовано з досвіду вивчення зорового сприйняття людини. Він ефективно розділяє просторову (інтенсивність) і спектральну (тон, насиченість) інформацію у стандартних RGB зображеннях і полягає в обрахуванні трьох величин [33]:

$$\begin{pmatrix} I \\ \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}; \quad H = \tan^{-1}\left(\frac{\nu_2}{\nu_1}\right); \quad S = \sqrt{\nu_1^2 + \nu_2^2}. \quad (4.5)$$

В усіх модифікаціях алгоритмів IHS закладений механізм заміщення однієї з трьох компонентів сигналом з іншого інформаційного каналу. Найчастіше заміщується інтенсивність. На практиці використовуються пряме IHS-перетворення і метод з заміщенням кольорових координат. В першому випадку обробляються сигнали про інтенсивність, тон і насиченість, які поступають по окремим інформаційним каналам. В другому випадку кольори трансформуються з RGB-простору в IHS координати. Фізичною інтерпретацією IHS координат приблизно можна вважати шорсткість поверхні об'єкта для інтенсивності, максимальну спектральну смугу відбиття для тону і чистоту поверхні для насиченості. Потім одна з компонент заміщається деякою четвертою функцією (здебільшого – контрастом), яка є основою для подальшого відновлення зображення. Комплексування здійснюється шляхом зворотнього перетворення з IHS координат в RGB координати [34]:

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I \\ \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}. \quad (4.6)$$

Таким шляхом (заміщенням розподілу інтенсивностей в спектральних каналах інтенсивністю з панхроматичного каналу високого просторового розділення з подальшим зворотнім

перетворенням в RGB координати) формуються високороздільні кольорові зображення земної поверхні з космосу.

В різних модифікаціях описаного методу допускаються лінійні перетворення, масштабування однієї з компонент перед зворотнім перетворенням, до того ж це масштабування може бути різним для кожної з величин. Одним з близьких до IHS методом є трансформування в координати тону, насиченості, амплітуди (т.зв. метод HIS або HSV [35]).

Метод яскравості-цвітності використовує перетворення сигналу з RGB координат в YIQ координати. В YIQ-просторі Y описує яскравість монохромного зображення, яке комбінується з блакитного, зеленого і червоного сигналів пропорційно до спектральної чутливості зорової системи. Компоненти I і Q є кольорами, що введені для полегшення обробки сигналу в реальних системах: I – це різницевий сигнал "червоний мінус блакитний (cyan)", Q – "пурпурний (magenta) мінус зелений). Пряме перетворення з RGB координат в YIQ координати описується формулою (4.7) [36]:

$$\begin{pmatrix} Y \\ I \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ 0,596 & -0,274 & -0,322 \\ 0,211 & -0,523 & 0,312 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}, \quad (4.7)$$

а зворотнє перетворення – формулою (4.8):

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,000 & 0,956 & 0,621 \\ 1,000 & -0,272 & -0,647 \\ 1,000 & -1,106 & -1,703 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y \\ I \\ Q \end{pmatrix}. \quad (4.8)$$

Компоненти Y , I , Q є менш корельованими між собою, ніж R , G , B , тому даний метод є більш ефективним для покращення зображень.

Якщо позначити панхроматичне зображення високого розділення як $D = D(m, n)$, а $B_k = B_k(m, n)$, $k = \overline{1, K}$ – зображення, отримані в K спектральних діапазонах одночасно з $D(m, n)$, і вважати, що всі ці зображення після проведення координатної обробки геометрично сполучені. одержання для $D(m, n)$ спектрозональних компонентів $D_k = D_k(m, n)$, $k = \overline{1, K}$, приблизно такого ж розділення включає два етапи.

На першому етапі по спектрозональним зображенням B_k , $k = \overline{1, K}$, виконується оцінка спектральної яскравості точок земної поверхні у вигляді полінома $G(\lambda) = \sum_{r=0}^{K-1} a_r \lambda^r$.

На другому етапі на основі зображень D , B_k , $k = \overline{1, K}$, і функції $G(\lambda)$ з використанням того або іншого алгоритму виконується формування D_k , $k = \overline{1, K}$.

Існують кілька підходів до рішення цієї задачі.

На основі B_k , $k = \overline{1, K}$ оцінимо спектральну яскравість спостережуваної сцени $G(\lambda) = \sum_{r=0}^{K-1} a_r \lambda^r$. Потім, використовуючи механізм модуляції сигналом D спектрозональних компонентів, які визначаються $G(\lambda)$ і границями спектральних діапазонів λ'_k, λ''_k , $k = \overline{1, K}$, одержимо:

$$D_k = D \frac{\int_{\lambda'_k}^{\lambda''_k} G(\lambda) d\lambda}{\frac{1}{K} \int_{\lambda'_1}^{\lambda''_K} G(\lambda) d\lambda} = D \frac{\sum_{r=0}^{K-1} \left(a_r \frac{(\lambda'_k)^{r+1} - (\lambda''_k)^{r+1}}{r+1} \right)}{\frac{1}{K} \sum_{r=0}^{K-1} \left(a_r \frac{(\lambda''_K)^{r+1} - (\lambda'_1)^{r+1}}{r+1} \right)}, \quad k = \overline{1, K}. \quad (4.9)$$

Вираз, що стоїть в знаменнику (4.9), впливає на розподіл енергетичної яскравості по діапазонах пропорційно співвідношенню спектрозональних сигналів B_k , $k = \overline{1, K}$.

По зображеннях D, B_2, B_3, \dots, B_K оцінимо $G_1(\lambda) = \sum_{r=0}^{K-1} a_{1r} \lambda^r$, після чого по виразу (4.9) одержимо перший компонент D_1 . По зображеннях B_1, D, B_3, \dots, B_K оцінимо $G_2(\lambda) = \sum_{r=0}^{K-1} a_{2r} \lambda^r$, після чого по виразу (4.9) одержимо D_2 . Далі за аналогією одержимо D_3, D_4, \dots, D_k . Тобто в даному підході для формування спектрозональної компоненти D_k використовується функція $G_k(\lambda)$, отримана по зображеннях B_j , $j \neq k$, і зображенні D , яке виступає замість B_k .

Аналогічно другому підходу одержимо $G_k(\lambda)$, $k = \overline{1, K}$. Далі сформуємо шукані зображення D_k , $k = \overline{1, K}$, наступним чином:

$$D_k = \int_{\lambda'_k}^{\lambda''_k} G_k(\lambda) d\lambda, \quad k = \overline{1, K}. \quad (4.10)$$

Аналогічно другому й третьому підходам одержимо $G_k(\lambda) = \sum_{r=0}^{K-1} a_{kr} \lambda^r$. Далі знайдемо середню характеристику

$$\overline{G}(\lambda) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K G_k(\lambda) = \sum_{r=0}^{K-1} \overline{a_r} \lambda^r, \quad \text{де} \quad \overline{a_r} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K a_{kr}.$$

Після цього одержимо

$$D_k = \int_{\lambda'_k}^{\lambda''_k} \overline{G}(\lambda) d\lambda, \quad k = \overline{1, K}. \quad (4.11)$$

Експериментально встановлено, що при $K \geq 3$ найбільш якісні результати дає перший підхід, при $K = 2$ - другий підхід.

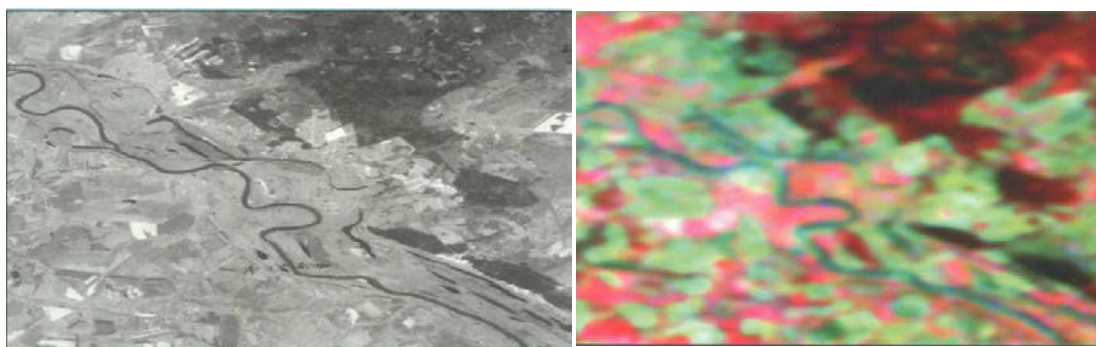
На рис. 4.8 представлені панхроматичний знімок (а)), спектрозональний знімок (б)), результат комплексування (в)) у вигляді спектрозонального зображення високого просторового розділення [36].

Очевидно, що рис. 4.8 в) по просторовому розділенню близький до панхроматичного знімку.

Серед арифметичних алгоритмів комплексування одними з найпростіших є різноманітні комбінації додавання та множення. Наприклад, один з таких алгоритмів ефективно працював з інформацією в космічних місіях Landsat-TM та SPOT [37]. Алгоритми комплексування сигналів двох каналів мали вигляд:

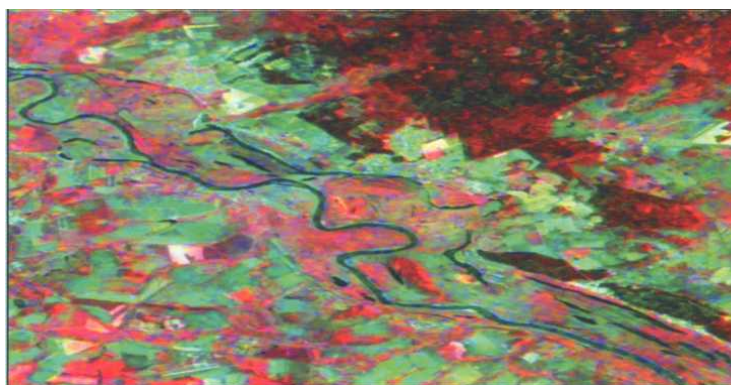
$$DN_f = A(w_1 DN_a + w_2 DN_b) + B, \quad DN_f = A DN_a DN_b + B, \quad (4.12)$$

де A , B – масштабні коефіцієнти; w_1 , w_2 – вагові коефіцієнти.



а) панхроматичний знімок

б) спектрозональний знімок



в) результат комплексування

Рис. 4.8 - Комплексування спектрозональних зображень з даними панхроматичної зйомки

Успішний вибір коефіцієнтів в формулах (4.12) забезпечує хороші результати комплексування [38 - 40]. Ці методи широко застосовуються

для комплексування панхроматичних і спектральних каналів космічних ОЕСС.

Принципово не відрізняються від розглянутих методи комплексування відніманням та діленням (досить замінити додатні коефіцієнти від'ємними). Часто на практиці такі методи є більш результативними, адже дозволяють реєструвати зміни в сигналах, які бувають дуже інформативними [41]. Враховуючи, що обчислена різниця може прийняти від'ємне значення, часто в різницевих алгоритмах вводять додатню підставку. У диференційних методах важливим є вибір верхнього і нижнього порогу різниці або відношення сигналів в пікселях комплексованих зображень: з одного боку важливо не допустити виникнення шумових викидів при наявності великих різниць вимірюваних величин, з другого – не пропустити малої зміни вимірюваної величини. Для цього використовують нормалізацію сигналів в каналах, наприклад, за алгоритмом (4.13) [42]:

$$\frac{XS_3 - XS_2}{XS_3 + XS_2} - \frac{TM_4 - TM_3}{TM_4 + TM_3} + C. \quad (4.13)$$

Для підвищення просторового розділення без помітних втрат радіометричного розділення використовується алгоритм [40]:

$$DN_{HybridXS(j)} = DN_{PAN} \frac{DN_{XS(i)}}{DN_{SynPAN}}, \quad (4.14)$$

де $DN_{HybridXS(j)}$ – результуючий піксел обробленого зображення;
 DN_{PAN} – поточний піксел панхроматичного каналу високого розділення; $DN_{XS(i)}$ – поточний піксел i -го спектрального каналу;
 DN_{SynPAN} – поточний піксел синтезованого панхроматичного каналу низького просторового розділення, який складається з усіх пікселів

спектральних каналів.

Схожі принципи закладені в алгоритм Брові (Brovey Transform), який використовується в RGB моніторах для нормалізації при покращенні якості зображень [35]:

$$DN_{fused} = \frac{DN_{b1}}{DN_{b1} + DN_{b2} + DN_{bn}} DN_{highres}, \quad (4.15)$$

де DN_{b1} - значення сигналів в поточному пікселі i -го спектрального каналу; $DN_{highres}$ - поточний піксел каналу високого розділення.

Суттєві обмеження на прості арифметичні методи накладають досить часті випадки реверсивних контрастів однакових об'єктів в різних каналах. Наприклад, контрасти в видимому діапазоні спектру вранці та ввечері є майже однаковими, а в ІЧ діапазоні більш масивні тіла ввечері мають додатній контраст за рахунок накопиченої енергії, а вранці – від'ємний. Відповідно, комплексування складанням дасть в різний час доби неоднакові результати.

Аналіз головних компонент – метод, що широко застосовується в стисненні та кодуванні зображень, виділенні релевантних ознак, в тому числі – контурів зображень, виявленні міжкадрових різниць, послідовному комплексуванні підвищенні відношення сигнал/шум [43] тощо. Цей алгоритм є статистичним і полягає в перетворенні набору взаємно пов'язаних багатоваріантних даних в нову комбінацію некорельованих перемінних. Тобто багатовимірний простір координат замінюється на більш простий з набором ортогональних осей. Аналіз головних компонент включає в себе обчислення кореляційної або коваріаційної матриці, власного вектора або характеристичного числа матриці, власне головних компонент. Зворотнє перетворення переводить набір даних в оригінальний параметричний простір.

Кореляційні матриці викликають масштабування осей таким чином, що ознаки набувають одиничної дисперсії. Це дозволяє уникнути домінування одної з великих за абсолютним значення ознак в описі зображень. Збільшення простору ознак покращує результати обробки [44].

Аналіз головних компонент може виконуватись двома способами – стандартним та вибіркоvim. В першому випадку використовуються всі доступні інформаційні канали, а в другому – тільки кілька попередньо відібраних. Такий відбір здійснюється на основі апіорних даних, наприклад, по максимальній мінливості сигналу в каналі.

Однією з найбільш вживаних методик з використанням даного алгоритму є отримання високороздільного кольорового зображення шляхом заміщення головної компоненти спектральних каналів з низьким просторовим розділенням даними з панхроматичного каналу, причому просторова інформація залишається єдиною для всіх каналів, а спектральна є індивідуальною для кожного [45]. Замість процедури заміщення однієї з компонент іншою даний алгоритм використовується також для обрахування єдиного комплексованого зображення з набору [46].

Для запобігання погіршення результату обробки внаслідок малого об'єму простору ознак для кожного з інформаційних каналів виконується т.зв. деко реляційне розширення. Воно полягає в переформатуванні мультиспектральної інформації в просторі головних компонент у кульове скупчення шляхом зміни масштабів осей [47].

Ще одним методом підвищення просторової роздільної здатності є високочастотна фільтрація з селекцією спектральних каналів. Зазвичай ця процедура полягає в високочастотній фільтрації даних в каналі з високою роздільною здатністю і в наступному попіксельному додаванні отриманої інформації у каналах з низькою роздільною

здатністю [43]. Одним з обмежень даної методики є небезпека втрати важливої інформації про текстури зображенні під час фільтрації.

В результаті багаторазової регресії з набору змінних можна сформулювати змінну, що є максимально корельованою з незмінними даними. В комплексуванні зображень така процедура називається регресійним заміщенням змінних і використовується для визначення лінійної комбінації взаємо замінимих інформаційних каналів. Звичайно, для ефективного комплексування одержана лінійна комбінація має враховувати більшість релевантних ознак, що містяться у вхідних зображеннях. Цей алгоритм є досить розповсюдженим у задачах виявлення між кадрових різниць, наприклад, при супроводженні об'єктів [41].

Ще одним з алгоритмів заміщення є аналіз канонічних величин, який на основі існуючих інформаційних каналів і лінійних операторів дозволяє формувати композитні канали з максимальним значенням варіацій вимірюваних величин. Ця методика потребує також ефективного механізму визначення малозмінних областей на зображеннях [48].

Потужним інструментом обробки зображень із змінною роздільною здатністю (multiresolution image processing) є вейвлет-перетворення [49, 50]. Значною перевагою цього інструменту порівняно з Фур'є перетворенням є локалізованість в площині об'єкту (зображення), недолік полягає в великій складності аналітичних обчислень. В основу вейвлет-перетворення покладені ієрархічні алгоритми згортки вхідного сигналу з деяким ядром із змінним масштабом. Такий підхід робить вейвлет-перетворення дуже ефективним при аналізі текстур, кодуванні сигналів, стеженні за об'єктами та розпізнаванні образів. З допомогою вейвлет-перетворення можна якісно комплексувати інформацію з каналів з різною роздільною здатністю, наприклад, «ОЕСС – радар з

синтезованою апертурою». Основою комплексування з допомогою вейвлет-перетворення є накладення спектральної інформації низького розділення на інформацію високого розділення на етапі розкладу останньої по вейвлет-базисам. Це можна зробити заміщенням, додаванням або вибором відповідних коефіцієнтів [51,52].

В ряді випадків одного алгоритму може бути не достатньо для вирішення задачі комплексування. Наприклад, це може бути при обробці зображень, що спотворені вібраціями, хмарністю та турбулентністю атмосфери, мають викривлену передачу кольорів тощо. В нагоді стають гібридні методики, яких існує дуже багато. Так можливі всілякі варіанти комбінацій методів композитних кольорів, IHS, аналізу головних компонент [53]. Наприклад, для комплексування видимого та ІЧ зображень широко застосовується поєднання методу IHS з арифметичними алгоритмами для покращення візуального сприйняття вихідного зображення [37], або з аналізом головних компонент. Підсилення контурної інформації за рахунок високочастотної фільтрації і подальшого комплексування перемноженням телевізійного і радарного зображень [54] можуть значно покращити якість зорового сприйняття інформації.

Окрема група методів призначена для відновлення зображень, які мають втрати інформації по полю кадру. Це явище спостерігається при частковому затіненні ФЦО, під впливом дефокусування або турбулентності атмосфери тощо. Для його усунення використовуються алгоритми зшивання єдиного зображення як мозаїки кількох зображень. Мозаїчні методи також комбінуються з іншими. Наприклад, при спостереженні на вертикальних хмарних трасах частину інформації видимого телевізійного каналу можна доповнити даними радару з синтезованою апертурою (нажаль практичне застосування такого комплексування є неефективним на гористих фонів).

Виходячи з реальних ситуацій, коли в ОЕСС співіснують кілька різноформатних МПВ, особливу увагу необхідно приділяти методам багатомасштабного комплексування.

Для отримання найбільшої ефективності виконання завдання всією інформаційною системою, до складу якої входить оператор, необхідно забезпечити як умова більший об'єм вхідної інформації для подальшого аналізу. Першим і універсальним напрямом у цьому є підвищення роздільної здатності вхідних каналів, або ОЕСС в цілому. Традиційними для обробки аерокосмічної інформації є алгоритми підвищення просторової роздільної здатності за рахунок комплексування панхроматичного високороздільного зображення з спектральними зображеннями низької роздільної здатності. Також використовуються методи підвищення роздільної здатності при послідовному комплексуванні сигналів з одного каналу. В будь-якому випадку необхідною умовою успішної обробки є достатньо висока точність реєстрації зображень. В принципі, якщо комплексування відбувається не на рівні чутників, то вимоги до геометричної точності суміщення різних кадрів знижуються, але на практиці намагаються як найбільш точно сумістити зображення [55, 56]. Для цього розробляються спеціальні алгоритми геометричної прив'язки, наприклад, табличні [45, 57].

Іншим напрямком підвищення інформативності вхідних даних є одержання стереоскопічних зображень, коли замість просторово двовірного сигналу аналізується тримірний. Сучасна стереофотограмметрія використовує комплексування різних тепловізійних, тепловізійних каналів, радарів з синтезованою апертурою. З точки зору комплексування однією з основних складностей є радіометрична відмінність між кадрами стереопар [58, 59].

Виділення рухомих об'єктів є ще одним з ефективних механізмів збільшення інформативних ознак. Для цього як правило використовується послідовне комплексування сигналу в одному каналі з наступною різницевою обробкою або методи головних компонентів [60]. Подібні алгоритми можна використовувати також і для спостереження за зміною стану нерухомих об'єктів.

При комплексуванні мультиспектральних субпіксельно зміщених зображень досягається підвищення просторової роздільної здатності по одній координаті. У цьому випадку лінійки встановлюються таким чином, щоб миттєві поля зору однойменних пікселів були зміщені відносно один одного на долю пікселя.

Нехай в кожному спектральному каналі встановлено по K ($k = \overline{1, K}$) однотипних лінійних МПВ так, що поле зору $(k+1)$ -ї лінійки зміщене відносно k -ї на величину d/K , де d — відстань між центрами сусідніх пікселів. В результаті сцена спостерігається в більш частій просторовій решітці з кроком d/K при полі зору окремого елемента рівному d , тобто апертура кожного елемента лінійного МПВ накриває K елементів решітки. Для випадка трьох лінійок розташування та геометрія полів зору зображена на рис. 4.9 [61].

У цьому випадку друга лінійка зміщена щодо першої на $d/3$, третя щодо першої на $-2d/3$, а апертура кожного елемента дорівнює d .

B_1, B_2, B_3 є зображеннями з лінійних МПВ з M пікселями, миттєві поля зору яких субпіксельно зміщені. ФРТ МПВ моделюється оператором розфокусування $H(t, p)$. При виконанні цієї операції масив елементів вихідного зображення $B' = B'(m, n)$, $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N}$ формується шляхом дискретної згортки вихідного зображення $B = B(m, n)$ з фільтром $H = H(t, p)$, $t = \overline{-0.5T, 0.5T}$, $p = \overline{-0.5P, 0.5P}$ (T

і P парні):

$$B'(m,n) = \sum_{t=-0.5T}^{0.5T} \sum_{p=-0.5P}^{0.5P} B(m,n)H(t,p). \quad (4.17)$$

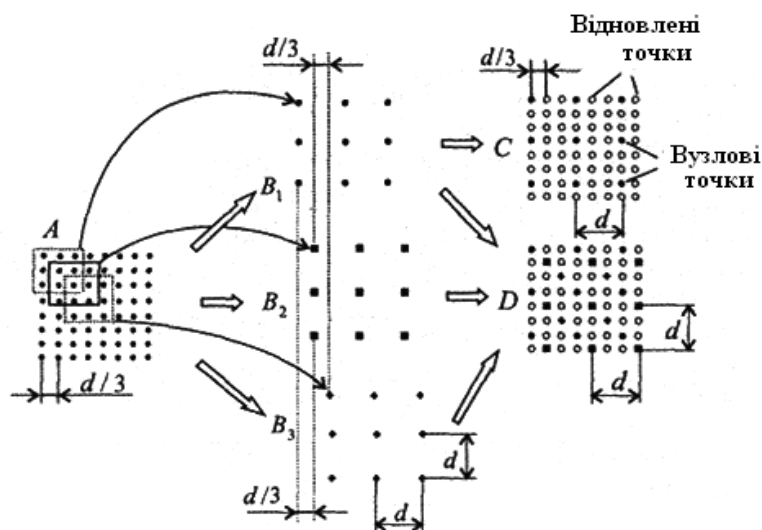


Рис. 4.9 - Модель формування даних з трьох лінійних МПВ: А - реальне зображення; B_1, B_2, B_3 - зображення, отримані з А за допомогою операцій розфокусування, проріджування та зміщення; С - відновлене зображення від однієї лінійки МПВ; D - результат комплексування зображень B_1, B_2, B_3

Для більшості реальних МПВ кожний піксел є квадратним, а сусідні елементи мають між собою проміжок, який значно менший у порівнянні з розмірами піксела. Тому ФРТ має форму, близьку до Π - подібної, і загальна ФРТ є матрицею H , у якій усі елементи рівні й у сумі становлять 1. Розміри цієї матриці визначаються числом лінійок МПВ й частотою їх опитування.

Операцією проріджування моделюється в рядковому напрямку число елементів в лінійці МПВ, а в кадровому напрямку — частота опитування лінійок. Вона виконується шляхом заповнення нулями непотрібних рядків і стовпців у зображенні, отриманому на основі розфокусування зображення А.

Операцією зміщення в рядковому напрямку моделюється взаємний зсув лінійок МПВ, а в кадровому напрямку - часовий інтервал між

початками опитування лінійок. Ця операція виконується на етапі проріджування, коли в кожному зображенні стовбці й рядки, що обнуляються, задаються таким чином, щоб вузлові точки цих зображень були зміщені відносно один одного.

Шляхом зіставлення зображення C з зображенням D можна оцінити ступінь поліпшення якості зображення D за рахунок комплексування. Використання двох лінійних МПВ, зміщених на 0,5 пікселя, підвищує роздільну здатність зйомки приблизно в 1,3 рази в порівнянні із зображенням, отриманим від однієї лінійки; використання трьох зміщених на $1/3$ пікселя лінійок дає підвищення роздільної здатності приблизно в 1,5 рази при відповідному виборі частоти опитування цих лінійок.

При комплексуванні субпіксельно зміщених знімків, одночасно отриманих в різних спектральних діапазонах, якість зображень підвищується як за рахунок огляду ФЦО в більш частій ґратці просторової дискретизації, так і за рахунок об'єднання інформації з різних спектральних діапазонів. На відміну від звичайних датчиків у цьому випадку поля зору лінійних МПВ субпіксельно зміщуються один відносно одного.

На рис. 4.10 зображено випадок комплексування трьох різноспектральних зображень ($K = 3$). На цій схемі представлено три вхідні спектрозональні зображення A_1, A_2, A_3 . Відстань між сусідніми пікселями для зображень A_1, A_2, A_3 становить $d/3$. Спектрозональні зображення B_1, B_2, B_3 сформовані трьома лінійками МПВ (з M елементами кожний), миттєві поля зору яких субпіксельно зміщені на $d/3$.

Зображення D отримане шляхом комплексування зображень B_1, B_2, B_3 . Зображення F отримане в частій ґратці шляхом

комплексування зображень від лінійок, що не мають субпіксельних зсувів полів зору, тобто зображень C_1, C_2, C_3 .

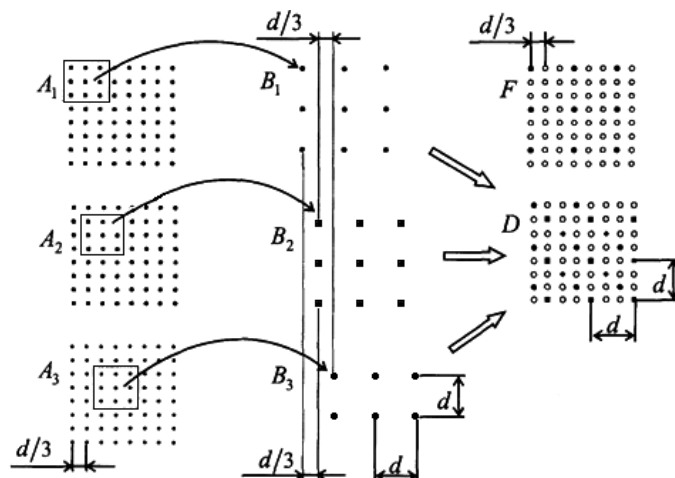
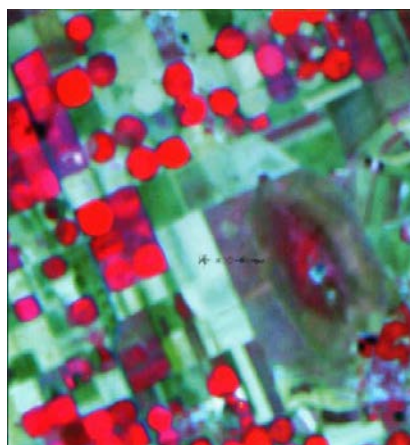
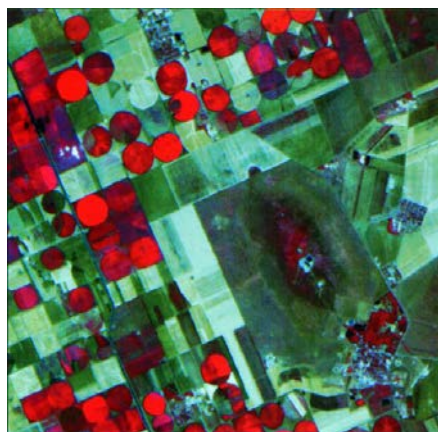


Рис. 4.10 - Модель комплексування при субпіксельному зміщенні у різних спектральних каналах

На рис. 4.11 наведено приклад комплексування даних від субпіксельно зміщених ПЗЗ- лінійок, установлених в різних спектральних каналах [61].



а) зображення з однією лінійкою МПВ



б) зображення з 3-ма суб-піксельно зміщеними лінійками

Рис. 4.11 - Комплексування субпіксельно зміщених зображень

Очевидним є підвищення просторової роздільної здатності в обробленому зображенні

Перелік посилань до розділу 4

1. Дистанционное зондирование: количественный подход / Ш.М.Дейвис, Д.А.Ландгребе, Т.Л.Филипс и др. Под ред. Ф.Свейна и Ш.Дейвиса. Пер. с англ. - М.: Недра, 1983.
2. Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года / http://www.gisa.ru/concept_drs.html.
3. Systematic Observation Requirements for Satellite-based Products for Climate, September 2006 / http://gosic.org/ios/GCOS_main_page.htm.
4. Schuler J. Image Registration Techniques for Image Fusion / www.logostech.net/imagefusion2005/MasterClass_Image_Registration.pdf.
5. Chen C. H., Cheng C., Page D., Koschan A., Abidi M. Modular Robotics and Intelligent Imaging for Unmanned Systems / Proc. SPIE Unmanned Systems Technology VIII. April 2006.- Vol. 6230.- Pp. 43-52.
6. Микитенко В.І. Комплексування інформації в оглядово-візирних системах керованих рухомих об'єктів / Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування.- 2005. – Вип. 30. – С. 36 - 41.
7. Steele P.M., Perconti P., (1997). Part task investigation of multispectral image fusion using gray scale and synthetic color night vision sensor imagery for helicopter pilotage // Proceedings of SPIE. – 1997. - V. 3062. - P. 88-100.
8. Essock E. A., Sinai M. J., DeFord J. K., Hansen B. C., Srinivasan N. Human Perceptual Performance With Nonliteral Imagery: Region Recognition and Texture-Based Segmentation // Journal of Experimental Psychology. – 2004. - V. 10, №. 2. – P. 97–110.
9. U.S. Department of Defense, Data Fusion Subpanel of the Joint Directors of Laboratories, Technical Panel for C3, "Data fusion lexicon," 1991.

10. Flusser J. Image fusion: principles, methods, and applications / J. Flusser, F. Sroubek, B. Zitova // European Signal Processing Conference EUSIPCO, 2007.
11. Rockinger O. Pixel-level image fusion: the case of image sequences / O. Rockinger, T. Fechner // Proc. SPIE. – 1998. – Vol. 3374. – pp. 378-388.
12. Shapiro L. G. Computer vision / Linda G. Shapiro, George C. Stockman. – Prentice Hall? 2001. – 580p.
13. Frucci M. From segmentation to binarization of gray-level images / Maria Frucci, Gabriella Sanniti di Baja // Journal of Pattern recognition Research. – 2008. – № 1. – pp. 1-13.
14. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms / N. Otsu // IEEE Transactions on Systems. Man and Cybernetics. – 1979. – Vol. SMC-9, № 1, pp. 62-66.
15. A comparison of decision-level sensor-fusion methods for anti-personnel landmine detection / F. Cremer, K. Schutte, J. G. M. Schavemaker [et al.] // Information Fusion. – 2001. – №2. – pp. 187-208.
16. Liggins M. E. Extensions to adaptive Boolean decision fusion / Martin E. Liggins // Proceedings of SPIE. – 2002. – Vol. 4729. – pp. 288-296.
17. Смагин М. С. Разработка методики синтеза структуры вычислительных устройств слияния изображений: дис. канд. техн. наук: 05.13.05 / М. С. Смагин. – М., 2008. – 198 с.
18. Burt P. T. The Laplacian pyramid as a compact image code / P. T. Burt, E. H. Andelson // IEEE Trans. Commun. – 1983. – № 31. – pp. 532-540.
19. Toet A. Merging thermal and visual images by a contrast pyramid / A. Toet, L. J. van Ruyven, J. M. Valetton // Optical Engineering. – 1989. – № 28. – pp. 789-792.
20. Burt P. J. A gradient pyramid basis for pattern-selective image fusion / P. J. Burt // Society for Information Display. Digest of Technical Papers.

– 1992. – pp. 447-467.

21. Toet A. Image fusion by a ratio of low-pass pyramid / A. Toet // Pattern Recognition Letters. – 1989. – Vol. 9, № 4. – pp. 245–253.

22. Image fusion by using steerable pyramid / Z. Liu, K. Tsukada, Y. K. Ho [et al.] // Pattern Recognition Letters. – 2001. – Vol. 22. – pp. 929-939.

23. Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation / S. Mallat // IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. – 1989. – Vol.11. – pp. 674-693.

24. Li H. Multisensor image fusion using the wavelet transform / H. Li, B. Manjunath, S. Mitra // Graphical Models Image Process. – 1995. – № 57. – pp. 235-245.

25. Rockinger O. Pixel-level fusion of image sequences using wavelet frames / O. Rockinger // Proceedings in Image Fusion and Shape Variability Techniques. – 1996. – pp. 149–154.

26. Rockinger O. Image sequence fusion using a shift-invariant wavelet transform / Oliver Rockiger // Proceedings of the 1997 International Conference on Image Processing (ICIP'97). – 1997. – Vol. 3. – pp. 288-291.

27. Котовський В.Й., Микитенко В.І. Багатоканальні системи технічного зору для дистанційного енергоаудиту складних об'єктів / Вісті академії інженерних наук України. – 2008. - № 2(36). – С.16 – 19.

28. Senthil Kumar S. PCA-based image fusion / Kumar S. Senthil, S. Muttan // Proc. SPIE. – 2006. – Vol. 6233. – pp. 62331T.

29. Sharma R. K. Adaptive and statistical image fusion / R. K. Sharma, Misha Pavel // SID Digest. – 1996. – Vol. XXVII. – pp. 969-972.

30. Comhaire A. L., Ozer A., Jaspar A. The contribution of ERS-1 and SPOT data in the morphologic and bathymetric study of the north sea and the Scheldt / Proceedings of First ERS-1 Pilot Project Workshop, Toledo, Spain, 22 - 24 June 1994, SP-365 (Paris: European Space Agency), pp. 297 - 302.

31. Gillespie A. R., Kahle A. B., Walker R. E. Colour enhancement of highly correlated images. I. Decorrelation and HSI contrast stretches // *Remote Sensing and Environment*, 1987, №20, pp. 209 - 235.
32. Daily M. Hue-saturation-intensity split-spectrum processing of SEASAT radar imagery // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1983, №49, pp. 349 - 355.
33. Harrison B. A., Jupp D.L.B. Introduction to image processing // *MicroBRIAN Resource Manual, Part 2.* -Melbourne: CSRIO Publications, 1990.
34. Carper W. J., Lillesand T. M., Kieffer R.W. The use of Intensity-Hue-Saturation transformations for merging SPOT Panchromatic and multispectral image data // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1990, №56, pp. 459 - 467.
35. Chiesa C. C., Tyler W. A. Data fusion of off -nadir SPOT panchromatic images with other digital data sources. ACSM-ASPRS Annual Convention // *Image Processing and Remote Sensing*, 1990, №4, pp.86 - 98.
36. Guo H.D., Pinliang D. Integrated MSS-SAR-SPOT-geophysical geochemical data for exploration geology in Yeder // *CAS-IRSA*, 1989, pp. 1- 8.
37. Ye'sou H., Besnus Y., Rolet J., Pion J. C. Merging Seasat and SPOT imagery for the study of geologic structures in a temperate agricultural region // *Remote Sensing of Environment*, №43, pp.265 - 280.
38. Welch R., Ehlers M. Merging multiresolution SPOT HRV and Landsat TM data // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, №53, 1987, pp.301 - 303.
39. Price J. C. Combining panchromatic and multispectral imagery from dual resolution satellite instruments // *Remote Sensing of Environment*, 1987, №21, pp.119 - 128.
40. Munechika C. K., Warnick J. S., Salvaggio, C., Schott J. R. Resolution enhancement of multispectral image data to improve classification

accuracy // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1993, №59, pp.67 - 72.

41. Singh A. Digital change detection techniques using remotely-sensed data // International Journal of Remote Sensing, 1989, №10, pp.989 - 1003.

42. Griffiths G. H. Monitoring urban change from Landsat TM and SPOT satellite imagery by image differencing // Proceedings IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '88), Edinburgh, Scotland, 13 - 16 September 1988, pp. 493 - 497.

43. Shettigara V. K. A generalized component substitution technique for spatial enhancement of multispectral images using a higher resolution data set // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1992, №58, pp.561 - 567.

44. Fung T., LeDrew, E. Application of Principal Component Analysis to change detection // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1987, №53, pp.1649 - 58.

45. Chavez P. S., Sides S. C., Anderson J. A. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: TM & SPOT pan // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1991, №57, pp.295 - 303.

46. Richards J. A. Thematic mapping from multitemporal image data using the principal component transformation // Remote Sensing of Environment, 1984, №16, pp.35 - 46.

47. Jutz S. L., Chorowicz J. Geological mapping and detection of oblique extension structures in the Kenyan Rift Valley with a SPOT/Landsat-TM datamerge // International Journal of Remote Sensing, 1993, №14, pp.1677 - 1688.

48. Campbell N. A. Towards more quantitative extraction of information from remotely sensed data // Advanced Remote Sensing, Conference Proceedings, Sydney, Australia, 1993, №2, pp.29 - 40.

49. Tang Z.W., Wang J.G., Huang S.J. The wavelet transformation application for image fusion // Wavelet Application VII, H. H. Szu, ed., Proc. SPIE 4056, 2000, pp.462-469.
50. Li H., Manjunath B.S., Mitra S.K. Multisensor image fusion using the wavelet transform // Graphical Models Image Processing №57, 1995, pp.235-245.
51. Nunez J., Otazu X., Fors O., Prades A., Pala V. Multiresolution based image fusion with additive wavelet decomposition // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, Vol. 37, No. 3, pp. 1204-1211.
52. Yocky D.A. Multiresolution wavelet decomposition image merger of Landsat Thematic Mapper and SPOT panchromatic data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1996, Vol. 62, №. 9, pp. 1067-1074.
53. Koopmans B. N., Richetti E. Optimal geological data extraction from SPOT Radar synergism with samples from Djebel Amour (Algeria), Red Sea Hills (Sudan), Sirte Basin (Libya) and Magdalena Valley (Colombia) // From Optics to Radar, SPOT and ERS Applications, Conference Proceedings, 10 - 13 May 1993, Paris, France, pp. 263 - 274.
54. Loercher G., Wever T. Integrated use of optical and radar data from the MACEurope campaign 1991 for geological mapping of the Hekla area // Proceedings First International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Strasbourg, France, 11 - 15 September 1994, pp. III-471- III-478.
55. Ehlers M. Multisensor image fusion techniques in remote sensing // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1991, №46, pp.19 - 30.
56. Welch R., Jordon T. R., Luvall J. C. Geocoding and stereo display of tropical forest multisensor data sets. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1990, №56, pp.1389 - 1392.
57. Pohl C. Geometric aspects of multisensor image fusion for topographic map updating in the humid Tropics. IT C publication 1996, No. 39

(Enschede: ITC), ISBN 90 61641217.

58. Raggam J., Almer A., Strobl D. A combination of SAR and optical line scanner imagery for stereoscopic extraction of 3-D data // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1994, №49, pp.11 - 21.

59. Toutin T., Rivard B. A new tool for depth perception of multi-source data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1995, №61, pp.1209 - 1211.

60. Mouat D. A., Mahin G. G., Lancaster J. Remote sensing techniques in theanalysis of change detection // Geocarto International, 1993, №2, pp.39 - 50.

61. Злобин В.К., Еремеев В.В. Обработка аэрокосмических изображений. – М.: Физматлит, 2006. – 288 с.

5 МЕТОДИКИ ВИМІРЮВАННЯ ОСНОВНИХ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВІЗІЙНИХ СИСТЕМ

Вимірювання технічних параметрів та характеристик тепловізорів наразі пов'язані з вирішенням досить різноманітних практичних задач. Перелік параметрів і характеристик складає десятки найменувань (див., наприклад, [1]): частота кадрів, формат кадра, миттєвий кут поля зору, кутове розділення, лінійне збільшення оптичної системи, діапазон робочих відстаней, число напівтонових градацій у зображенні, робочий спектральний діапазон, тип і характеристики приймача випромінювання, необхідність і спосіб охолодження приймача випромінювання, тривалість безперервної роботи, час виходу на робочий режим, напруга живлення, споживана потужність, масо-габаритні параметри, діапазон вимірюваних температур, мінімальна виявлювальна та роздільна різниця температур, градуювальна характеристика, стабільність показань тощо.

Вказані характеристики можна розділити на чотири групи: енергетичні, просторові, суб'єктивна якість зображення, узагальнена якість зображення, які часто є взаємно пов'язаними. Алгоритми вимірювань і стендова апаратура визначаються змістом виконуваного експериментального дослідження. Нижче наведені методики вимірювання основних характеристик тепловізорів, які дозволяють найбільш повно оцінювати ефективність їх функціонування. Як показано раніше, при створенні тепловізорів у якості узагальненої оцінки якості можна було б використовувати ймовірність виявлення або розпізнавання об'єктів при заданому алфавіті об'єктів. Але це не завжди зручно, тому що для різних типів тепловізорів алфавіт класів

може різнитися. Тому для оцінки якості тепловізорів доцільно вимірювати менш узагальнені енергетичні та просторово-частотні характеристики: ЕШРТ (NETD), МВРТ (MDTD), МРРТ (MRTD). Перша з характеристик відноситься до т.зв. об'єктивних показників, які оцінюються на основі показників приладів. Друга і третя характеристики є суб'єктивними і в ході їх визначення задіяний оператор. Враховуючи значну інформативність і розповсюдженість в розрахункових методиках, в даному розділі також буде розглянуто вимірювання МПФ.

Цікаво, що фактично ЕШРТ, МВРТ, МРРТ пов'язані між собою видом тестового об'єкта, який використовується для їх вимірювання – в усіх випадках розглядається прямокутний об'єкт (або їх група) на рівномірному фоні. Тепловізор складається, як мінімум, з тепловізійної передавальної камери і монітору. Об'єктивні характеристики тепловізора, як правило, вимірюють на виході передавальної камери, а суб'єктивні - на виході монітору.

Узагальнена схема вимірювального стенду зображена на рис. 5.1.

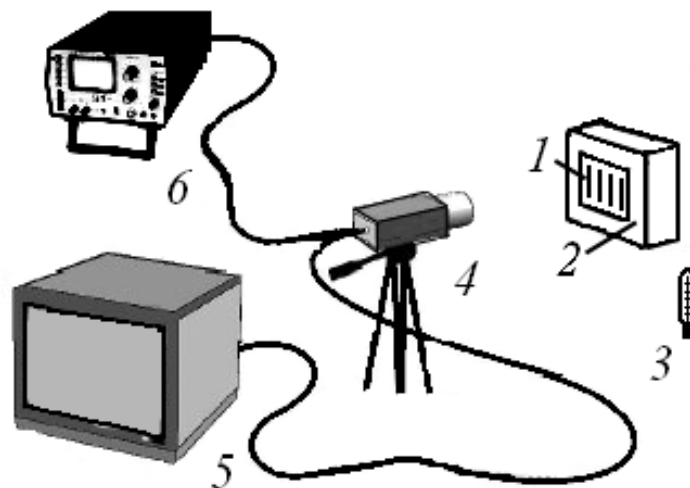


Рис. 5.1 - 1 - тест-об'єкт; 2 - джерело фонового випромінювання; 3 – термометр; 4 - тепловізійна камера; 5 – монітор; 6 - прилад реєстрації та вимірювання

Перед початком експерименту випробуваний тепловізор необхідно прогріти протягом часу, зазначеного в експлуатаційній документації. Засоби, які використовуються при вимірюваннях мають бути повірені й атестовані. Фоновий випромінювач конструктивно виконується у вигляді металевої кювети, заповненої водою. Робоча грань кювети повинна мати розміри не менш (400×400) мм² і коефіцієнт теплового випромінювання - не менш 0,96. Тест-об'єкт може бути виконаний у вигляді металевої кювети, заповненої водою (для вимірювання NETD), або у вигляді металевої пластини, робоча грань якої має коефіцієнт теплового випромінювання не менше 0,96, а протилежна грань - не більше (0,1 - 0,2). Для покриття робочих граней можна використовувати матові емалі типу АК-512 за ГОСТ 23171-78, або ХС-119 за ГОСТ 21824-76.

5.1 Вимірювання еквівалентної шуму різниці температур

Для вимірювання NETD у полі зору тепловізійної камери 4 (рис. 5.1) розташовуються на одному рівні й у одній площині на відстані не менш 100 мм одна від одної дві кювети з водою (рис. 5.2), що мають перепад температури, який у (5 – 10) разів перевищує очікувану NETD й на (5 – 10) °С вище температури оточуючого середовища. Температуру кювет підтримують із похибкою не більше $\pm 0,1$ °С.

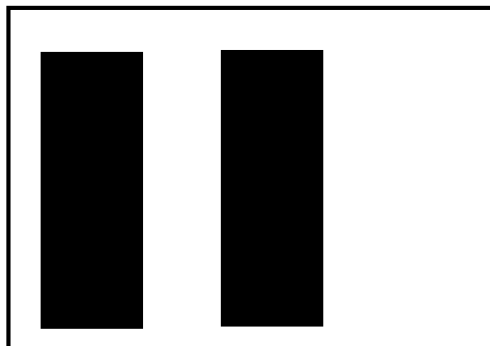


Рис.5.2 – Вид тест-об'єкта для вимірювання NETD

Потім за допомогою приладу реєстрації та вимірювання б фіксують термограми обох кювет. Приблизний вигляд термопрофілю зображено на рис. 5.3.

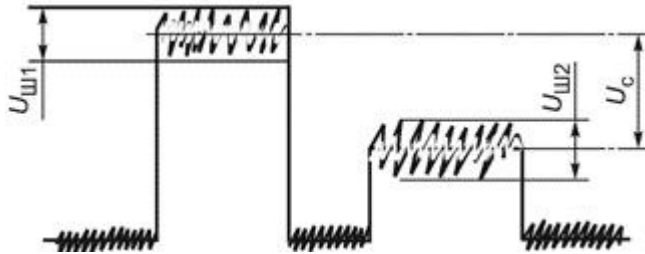


Рис. 5.3 – Приблизний вигляд термопрофілю для визначення NETD тепловізора

Знаючи різницю температур ΔT між кюветами, пікове значення напруги сигналу U_c , що вимірюється по термограмі, ефективне значення напруги шуму $U_{шеф} = (U_{ш1} + U_{ш2})/2$, також виміряне по термограмі, визначають NETD за формулою:

$$NETD = \Delta T (U_{ш1} + U_{ш2}) / 12 U_c, \quad (5.1)$$

де $U_{шеф} / 6$ - середньоквадратичне значення напруги шуму.

5.2 Вимірювання мінімальної виявлювальної різниці температур

Вимірювання MDTD полягає у візуальному спостереженні квадратного тест-об'єкту (рис. 5.4), розташованого перед фоновим випромінювачем значно більших розмірів. Розміри тест-об'єкту повинні бути не менше 100x100 мм².

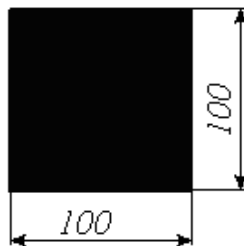


Рис. 5.4 - Тест-об'єкт для вимірювання MDTD

Спочатку температуру T_{ϕ} води в кюветі фонового випромінювача встановлюють близькою до температури навколишнього середовища, тобто до температури $T_{об}$ тест-об'єкту. Поступово збільшують температуру води доти, поки зображення тест-об'єкта на екрані монітору не стаю помітним хоча б двом спостерігачам. Визначивши поточні значення температур T_{ϕ} і $T_{об}$ в момент візуального виявлення зображень, обчислюють MDTD:

$$MDTD = T_{об} - T_{\phi}. \quad (5.2)$$

5.3 Вимірювання мінімальної роздільної різниці температур

Для вимірювання мінімальної роздільної різниці температур MRTD використовуються штрихові міри (рис. 5.5) з різною просторовою частотою.

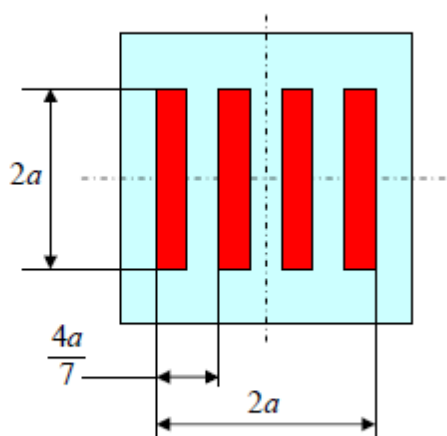


Рис. 5.5 - Штрихова тест-міра для вимірювання мінімальної роздільної різниці температур

В полі зору тепловізора на відстані (30 – 50) мм перед фоновим випромінювачем встановлюють штрихову міру з найменшою просторовою частотою штрихів. Спочатку температуру T_{ϕ} води в кюветі фонового випромінювача встановлюють близькою до

температури навколишнього середовища, тобто до температури $T_{об}$ тест-об'єкту, так, щоб різниця температур штрихів і проміжків між ними була близька до нуля. Поступово збільшують температуру води фонового випромінювача та записують значення отриманого перепаду температур у момент часу, коли штрихи розрізняються хоча б двома спостерігачами. Ці операції по чергово проводять з мірами більших просторових частот. За результатами вимірювань мінімальну роздільну різницю температур знаходять за формулою

$$MRTD(\nu_x) = T_{\phi}(\nu_{xi}) - T_{об}(\nu_{xi}), \quad (5.3)$$

де ν_x – просторова частота штрихової міри, яку розраховують за формулою:

$$\nu_x = R / 2af',$$

де a – ширина штриха; R – робоча відстань від об'єктиву тепловізора до міри; f' – фокусна відстань об'єктиву тепловізора.

По отриманих даних можна побудувати функцію MRTD, яку інколи називають просторово-частотною температурною характеристикою $MRTD = f(\nu_x)$. Для прискорення вимірів оптичних характеристик розроблені методи, в яких використовуються оптичні фільтри з коефіцієнтом послаблення, що швидко регулюється при фіксованій різниці температур. Фільтри можуть бути виконані, наприклад, у вигляді поворотних сіток з квадратними отворами, що встановлені перед вихідним вікном тепловізора.

5.4 Вимірювання МПФ

У розвитку установок для вимірювання просторово-частотних характеристик оптико-електронних систем можна виділити три етапи:

1) перше покоління - це найбільш прості установки, створені на базі універсальної оптичної лави або окремого приладу, якіть

зображення якого треба досліджувати. До лави або такому приладу додаються періодичний тест-об'єкт, щілина аналізатора та приймач випромінювання. У якості тест-об'єкту часто використовуються елементи штрихових мір, що мають прямокутний профіль штрихів. При скануванні зображення міри щілиною результат виміру представляється у вигляді модульованого електричного сигналу, по якому підраховується модуляція в зображенні й обчислюється МПФ;

2) установки другого покоління - це найчастіше спеціалізовані прилади, створені на базі спеціальних точних оптичних лав і призначені для виміру МПФ оптичних систем у широкому діапазоні їх фокусних відстаней і полів зору. В установках цього покоління, розвиток яких триває, періодичні ґрати тест-об'єкта або аналізатора переміщається рівномірно або за певним законом; при цьому виконується гармонійний аналіз зображення, тобто вимірюються амплітуди й фази змінних складових електричного сигналу для різних просторових частот. Результат виміру – безпосередньо значення МПФ і ФПФ;

3) установки третього покоління також використовують сканування зображення, побудованого досліджуваної оптичною системою, але на відміну від установок першого й другого типів мають неперіодичний тест-об'єкт. Зображення некогерентно освітленого тест-об'єкта, а саме щілини або краю півплощини, створене досліджуваної системою, сканується вузькою щілиною, тобто безпосередньо вимірюється функція розсіювання лінії або прикордонна крива. Отриманий сигнал обробляється по спеціальних програмах і обчислюється МПФ і ФПФ.

На відміну від суто оптичних систем, ТПСС є системою у складі тепловізійної камери та монітору. При невеликих температурних

контрастах і невеликих полях зору ця система може вважатись інваріантною і її МПФ визначається добутком

$$M(v_x, v_y) = M_K(v_x, v_y) \cdot M_M(v_x, v_y), \quad (5.4)$$

де $M_K(v_x, v_y)$ - МПФ тепловізійної камери; $M_M(v_x, v_y)$ - МПФ монітору.

Експериментальні та теоретичні дослідження свідчать про те, що МПФ більшості тепловізорів визначаються насамперед МПФ тепловізійної камери:

$$M(v_x, v_y) \approx M_K(v_x, v_y) .$$

Для вимірювання МПФ тепловізора можна використовувати як прямі, так і непрямі методи.

Прямі методи полягають в вимірюванні рівня сигналу від періодичного тест-об'єкту з синусоїдальним розподілом енергетичної яскравості вздовж однієї координати (рис.5.6, а). Практична реалізація таких вимірювань в інфрачервоному діапазоні спектру з достатньою точністю наразі є дуже проблематичною внаслідок складності виготовлення синусоїдальних тест-об'єктів різної просторової частоти. Тому в вимірювальних стендах для тепловізійної апаратури часто використовуються скінченні штрихові періодичні тест-об'єкти (рис. 5.6, б).

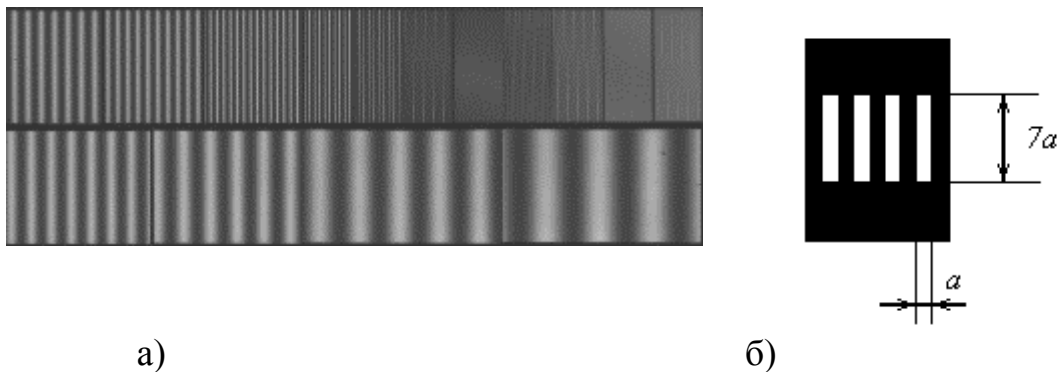


Рис. 5.6 - Тест-міра для вимірювання МПФ: а) синусоїдальний тест-об'єкт; б) штрихова тест-міра

В цьому випадку для розрахунків фактичних МПФ необхідно враховувати, по-перше, просторову обмеженість тестових мір, по-друге, відмінність розподілу вхідного сигналу від гармонійного.

Для того, щоб досліджувана оптично-електронна система реагувала на реальний тест-об'єкт як на нескінченно-протяжний, ширина зображення кожного штриха міри певної просторової частоти, повинна істотно перевищувати ширину функції розсіювання досліджуваної системи (інакше не вдасться точно виміряти найбільший і найменший сигнали при скануванні вздовж вибраного напрямку). Як показують розрахунки, в ідеальному випадку з безабераційним об'єктивом результат вимірювання МПФ перестає залежати від числа n періодів міри вже при $n = 7$, а при $n = 5$ похибка у визначенні МПФ не перевищує 1%.

В разі заміни об'єкту з синусоїдальним розподілом енергетичної яскравості на штрихову тест-міру, вхідний сигнал є сумою елементарних синусоїд з частотами, кратними $2n + 1$, де n - номер гармоніки. Для розрахунку МПФ по штриховому тест-об'єкту необхідно виділити першу гармоніку у виміряному сигналі. Основними методами виділення потрібної гармоніки з сумарного сигналу є фільтрація за допомогою електричного фільтру, оптична фільтрація з використанням перетворення Фур'є, перерахунок контрасту зображення штрихової міри в контраст зображення синусоїдальної міри по формулі Колтмена (виключно для осьової точки об'єкту) [2].

Формула Колтмена дає можливість визначити контраст в зображенні синусоїдальної міри по контрасту в зображенні штрихової міри і навпаки. За кордоном просторово-частотну залежність передачі контрасту в зображенні штрихової міри називають функцією передачі контрасту (Contrast Transfer Function, CTF). Залежність МПФ від CTF для деякої частоти ν має вигляд:

$$M(\nu) = K_c(\nu) = \frac{\pi}{4} \left[K_n(\nu) + \frac{K_n(3\nu)}{3} - \frac{K_n(5\nu)}{5} + \frac{K_n(7\nu)}{7} + \frac{K_n(11\nu)}{11} - \frac{K_n(13\nu)}{13} - \frac{K_n(15\nu)}{15} - \frac{K_n(17\nu)}{17} + \frac{K_n(19\nu)}{19} \dots \right], \quad (5.5)$$

де $K_c(\nu)$ - контраст зображення синусоїдальної міри з частотою ν ; $K_n(\nu)$ - контраст зображення прямокутної міри з частотою ν ;

а обернена залежність має вигляд:

$$K_n(\nu) = \frac{4}{\pi} \left[M(\nu) - \frac{M(3\nu)}{3} + \frac{M(5\nu)}{5} - \frac{M(7\nu)}{7} + \frac{M(9\nu)}{9} - \frac{M(11\nu)}{11} + \dots \right]. \quad (5.6)$$

Із наведених формул (5.5), (5.6) видно, що перша залежність, на відміну від другої є нерегулярною. Таким чином, використання формули Колтмена збільшує об'єм вимірювань внаслідок необхідності визначати контраст по прямокутній мирі для кількох додаткових значень частот, крім заданих. Наприклад, якщо смуга частот, які пропускає система обмежена значенням 130 мм^{-1} , то для обчислення МПФ на частоті $\nu = 10 \text{ мм}^{-1}$, необхідно визначити СТФ на 6-ти просторових частотах - $\nu = 10, 30, 50, 70, 110, 130 \text{ мм}^{-1}$:

$$M(10) = \frac{\pi}{4} \left[K_n(10) + \frac{K_n(3 \cdot 10)}{3} - \frac{K_n(5 \cdot 10)}{5} + \frac{K_n(7 \cdot 10)}{7} + \frac{K_n(11 \cdot 10)}{11} - \frac{K_n(13 \cdot 10)}{13} \right].$$

Зазвичай можна обмежитися першими трьома або чотирма членами формули, оскільки наступні члени мають невеликі значення. Для першої гармоніки модульованого сигналу формули (5.5), (5.6) спрощуються:

$$M(\nu) = \frac{\pi}{4} \cdot K_n(\nu), \quad K_n(\nu) = \frac{4}{\pi} \cdot K_c(\nu).$$

Величина СТФ $K_n(\nu)$ для поточної просторової частоти ν є відношенням контрасту зображення прямокутною міри цієї частоти до контрасту самої міри. В разі використання міри одиничного контрасту СТФ дорівнює контрасту зображення міри і обчислюється за формулою

$$K_n = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}, \quad (5.7)$$

де L_{\max}, L_{\min} - максимальна і мінімальна яскравість зображення тест-об'єкту відповідно.

Для визначення МПФ тепловізійної камери, на виході якої немає зображення, величини L_{\max}, L_{\min} потрібно замінити на відповідні максимальну і мінімальну амплітуди I_{\max}, I_{\min} відеосигналу в рядку телевізійної розгортки (рис. 5.7).

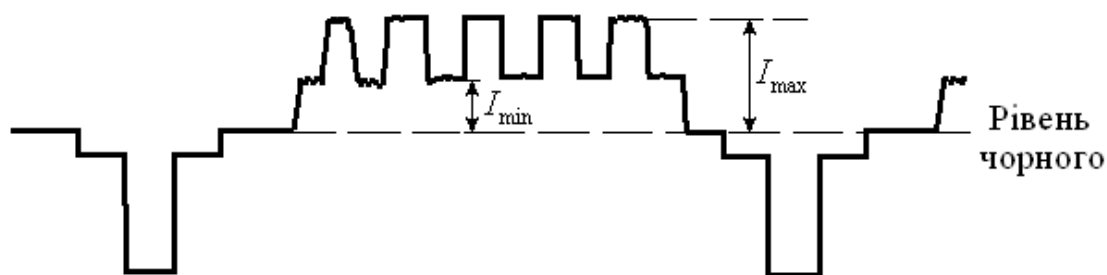


Рис. 5.7 - Вимірювання сигналів в рядку для визначення СТФ

Схему установки для вимірювання МПФ зображено на рис. 5.1. Установка складається з імітатора теплових полів, тепловізійної камери 4, монітору 5 та приладу реєстрації та вимірювання 6.

Імітатор теплових полів призначений для встановлення та підтримання необхідного температурного контрасту на тест-об'єкті заданої просторової частоти. Він складається з тест-об'єкта 1 (рис. 5.1) і джерела фонового випромінювання 2. Управління температурою джерела фонового випромінювання 2 здійснюється електричним нагрівачем і контролюється з допомогою термометра 3.

Внаслідок того, що телевізійний сигнал є одновимірним і є результатом рядкової розгортки, вимірювання як правило виконуються тільки для горизонтально орієнтованої тест-міри.

Після ввімкнення і прогріву тепловізійної камери, монітора та приладу реєстрації та вимірювання з набору штрихових мір перед джерелом фонового випромінювання (кюветою з водою) встановлюється міра з найменшою просторовою частотою. Міру, температура якої вважається рівній температурі оточуючого середовища, розташувати на відстані приблизно 50 мм від фонового випромінювача в центрі поля зору тепловізійної камери. За допомогою електроводонагрівача температура фонового випромінювача доводиться до величини, що на кілька градусів перевищує температуру об'єкту. Температура контролюється термометром. Рівномірність температури по полю зору необхідно забезпечити перемішуванням води в кюветі.

З допомогою приладу реєстрації та вимірювання визначається максимальна і мінімальна амплітуди I_{\max}, I_{\min} відеосигналу від штриха міри в рядку телевізійної розгортки (рис. 5.7). Дані заносяться в таблицю. В ході вимірювань необхідно запобігати потраплянню в поле зору тепловізійної камери сторонніх нагрітих предметів та людей. Вимірювання виконувати в центральній частині штрихової міри. Вимірювання повторюються для всього набору мір.

Просторова кутова частота ν_{xi} кожної міри розраховується виходячи з фокусної відстані об'єктива тепловізійної камери і відстані до об'єкта таким же чином, як при вимірюванні MRTD.

За значеннями I_{\max}, I_{\min} для кожної міри з частотою ν_{xi} розраховуються контрасти $K_n(\nu_{xi})$ по формулі (5.7), де L_{\max}, L_{\min} замінено на I_{\max}, I_{\min} . Дані заносяться в таблицю. Для кожної міри

частотою ν підбираються частоти в 3, в 5, в 7 (і т.д. в залежності від вимог до точності вимірювань) разів більші та вираховуються відповідні контрасти $\frac{K_{\pi}(3\nu)}{3}, \frac{K_{\pi}(5\nu)}{5} \dots$. Дані заносяться в таблицю. За формулою (5.5) розраховуються значення МПФ $M(\nu)$ на всіх частотах.

Серед непрямих методів вимірювань найбільш розповсюдженим є обчислення МПФ як просторового Фур'є-спектру від функції розсіювання лінії. Такий метод потребує додаткових обчислень, що наразі є стандартною процедурою.

Склад вимірювального стенду є таким же, як показано на рис. 5.1. Практична реалізація лінійної теплової міри в вигляді двох плоских заслінок на фоні з перемінною температурою не викликає жодних складнощів. Але для більшого спрощення вимірювального стенду можна використовувати також як тест-об'єкт напівплощину. По отриманій прикордонній кривій можна перерахуванням визначити функцію розсіювання лінії, МПФ й інші просторово-частотні характеристики.

Слід зазначити, що наведені методики не враховують можливий вплив просторової вибірки МПВ на результуюче зображення. В напрямку як рядка, так і стовбця існує вибірка з відповідними значеннями просторових частот ν_{ex}, ν_{ey} , яка як нелінійна операція, не може бути описана з допомогою МПФ. Тому [3 - 5]:

- для будь-якої фіксованої фази стандартної міри через взаємодію її періодичної структури та МПВ виникають «биття» контрасту зображення цієї міри із частотою $\nu_{\Delta} = 2(\nu_n - \nu_{мири})$ (рис. 5.8). Внаслідок цього МРРТ виявляється немонотонною: зі збільшенням частоти мири відповідне значення МРРТ на ділянці $0,6 \nu_n$ і $0,9 \nu_n$ трохи зменшується (рис. 5.9);

- для будь-яких значень кутової частоти теплової міри МРРТ залежить від фази цієї міри - зміщення смуг міри щодо структури тепловізійного зображення;
- зображення стандартної міри будь-якого контрасту з кутовою частотою $\nu_{\text{міри}}$, що перевищує $(1 \dots 1,1) \cdot \nu_n$, де $\nu_n = \nu_{\text{с}}/2$ - частота Найквіста, містить не більш трьох візуально роздільних смуг. Тобто класичний критерій просторового розділення міри, при якому має бути забезпечено розрізнення на зображенні всіх чотирьох смуг, в даному випадку не є прийнятним. Саме із цієї причини відома модель FLIR-92 визначає МРРТ з вибіркою лише до частоти ν_n . Ефект втрати смуги міри в її зображенні може бути відсутнім при використанні трьохштрихової міри замість чотирьохштрихової.

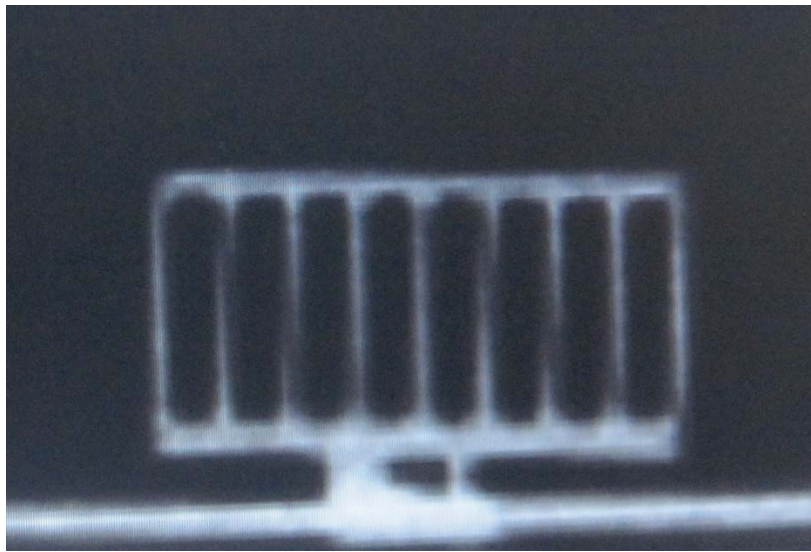
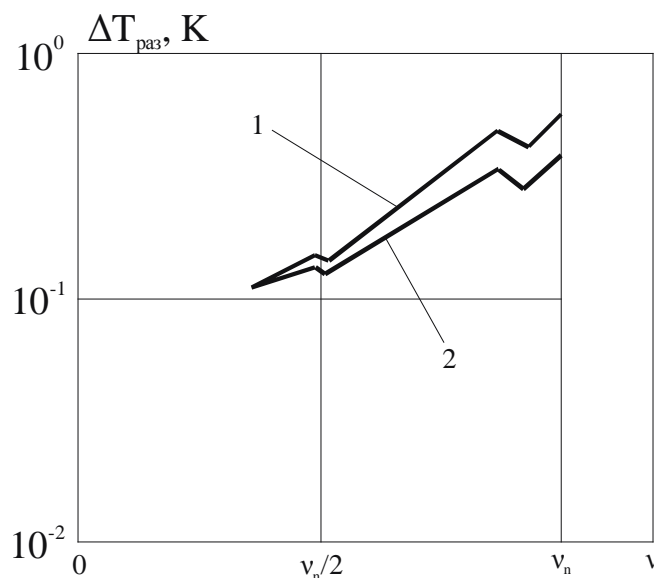


Рис. 5.8 – Ефект перенакладення просторових частот при відносному нахилі орієнтації МПВ та штрихів міри



1 – найгірше положення (фаза) міри; 2 – оптимальне положення (фаза) міри

Рис. 5.9 – МРРТ тепловізора з МПВ [5]

Вказані недоліки відсутні в методиці, що була запропонована в [4]. Замість МРРТ автор використовує поняття «minimum temperature difference perceived» - різниця температур, яка сприймається. Вона визначається як різниця радіаційних температур стандартної теплової міри і фону, за якої будь-які дві суміжні смуги міри на тепловізійному зображенні візуально сприймаються роздільно при оптимальній фазі цієї мири. Під оптимальною фазою тут розуміється фаза міри, що забезпечує найкраще розрізнення її будь-яких двох суміжних смуг. Температурно-частотна характеристика при цьому виявляється практично монотонною й обмежується лише межею кутового розділення.

Інший підхід до вимірювання МРРТ ТПСС з МПВ запропоновано в [3, 5]. Було встановлено що більш точний прогноз реальних можливостей ТВП у натурних умовах забезпечує так звана динамічна МРРТ, яка визначається протягом відносного руху міри та ТПСС.

При цьому за рахунок інерції зорового аналізатора фазові ефекти перенакладення просторових частот міри і МПВ згладжуються і спостерігач може бачити всі чотири смуги міри.

Для оцінки значень динамічної МРРТ в [5] запропоновано модель, згідно з якою ця функція співпадає зі звичайною (статичною) МРРТ при оптимальній фазі міри. При цьому статична МРРТ розраховується для ефективного миттєвого поля зору, яке враховує змаз зображення при русі міри і поріг чутливості. Це пояснюється тим, що при відносному русі міри й ТПСС просторовий шум, фактично, трансформується в часовий, який усереднюється по суміжним кадрам. Динамічна МРРТ, на відміну від статичної, не залежить від фази міри, є монотонною у всій області визначення і ця область не обмежена частотою Найквіста.

При вимірюванні динамічної МРРТ ТПСС встановлюється на платформу, яка повертає або переміщає систему відносно тест-об'єкта. Тест-об'єкт розміщують у фокальній площині коліматора. Амплітуда переміщень має бути такою, щоб зображення міри знаходилося б в межах 50% поля зору ТПСС. Швидкість повороту/переміщення має бути такою, щоб, з одного боку, фазові ефекти були досить згладжені та не обмежували просторове розділення частотою Найквіста, а з іншого, щоб розмивання зображення міри внаслідок її руху ще не знижувало суттєво розділення. Як показали експерименти [3, 5], дана швидкість має відповідати швидкості переміщення зображення міри 25 елементів розкладу в секунду, що дорівнювало частоті кадрів 25 Гц.

Перелік посилань до розділу 5

1. ГОСТ Р 53466—2009. Оптика и оптические приборы. ТЕПЛОВИЗОРЫ МЕДИЦИНСКИЕ. Общие технические требования. Методы измерений основных параметров.
2. Coltman J.W. The specification of imaging properties by response to a sine-wave input / J. Opt. Soc. America, 1954, v.44, №6.
3. Driggers, R. G., Webb, C., Pruchnic, S. J. et al. Laboratory measurement of sampled IR imaging system performance // Optical Engineering, 1999. - V. 38, №5. – pp. 852–861.
4. Wittenstein W. Minimum temperature difference perceived - a new approach for assess undersampled thermal imagers // Optical Engineering, 1999. - V. 38, №5. – pp. 773-781.
5. Webb C., Halford C. Dinamic minimum resolvable temperature testing for staring array imagers // Optical Engineering. - 1999. - V. 38. - №5.